



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**NÁVRH ASFALTOVÉ SMĚSI S POUŽITÍM 30 % R-
MATERÁLU A JEJÍ POSOUZENÍ FUNKČNÍMI
ZKOUŠKAMI**

BITUMINOUS MIXTURE DESIGN WITH THE USE OF 30 % RECLAIMED ASPHALT AND ITS
FUNCTIONAL EVALUATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Horáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Daniel Horáček
Název	Návrh asfaltové směsi s použitím 30 % asfaltového recyklátu a její posouzení funkčními zkouškami
Vedoucí práce	prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka,
CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN 73 6121, ČSN EN 130108 Asfaltový beton

Zkušební normy řady ČSN EN 12697

TP MD 151 Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)

ČSN 65 7222-2

TP MD 148 Hutněné asfaltové vrstvy a asfaltem modifikovanými pryžovým granulátem

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Návrh a laboratorní příprava asfaltové směsi typu VMT 16 s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem s přidáním 30 % R-materiálu o zrnitosti do 11 mm. Stanovení základních charakteristik směsi a stanovení modulu tuhosti, únavy a nízkoteplotních vlastností směsi. Porovnání vlastností s TP 151.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Cílem mojí bakalářské práce je návrh asfaltové směsi s vyšší životností (směsi typu VMT 16) a její následné posouzení vybranými funkčními zkouškami. Směsi VMT se používají pro ložní a podkladní vrstvy vozovek s vyšším dopravním zatížením. Hlavní myšlenkou této bakalářské práce je návrh takové asfaltové směsi, která bude složena z přírodních kameniv, recyklovaných asfaltových směsí a asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem, a přesto si zachová dobré vlastnosti pro použití ve vozovce. Použití recyklovatelných asfaltových směsí umožní znovupoužít vybourané nebo vyfrézované asfaltové vrstvy, kterých je v současnosti vysoký přebytek a umožní snížit celkové náklady na stavbu nových asfaltových vrstev s vysokou kvalitou. V bakalářské práci je popis provedených empirických a funkčních zkoušek, podle nichž byla výsledná asfaltová směs navržena, a výsledky porovnány s TP151 - Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT).

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti, R-materiál, asfalt, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, tuhost, únava, mrazové trhliny.

ABSTRACT

The aim of my bachelor thesis is to design asphalt mixture with a higher lifetime (mixture of type VMT 16) and its subsequent assessment by selected functional tests. VMT blends are used for load and underlayer layers of roads with higher transport loads. The main idea of this bachelor thesis is the design of an asphalt mixture consisting of natural aggregates, recycled asphalt mixtures and crumb rubber modified bitumen, yet retaining good road-holding properties. The use of recyclable bituminous mixtures will allow the recycling of bent or milled asphalt layers, which is currently high in surplus, and will allow the overall cost of building new high-quality asphalt layers to be reduced. The bachelor thesis describes the empirical and functional tests performed, according to which the resulting asphalt mixture was designed, and the results compared with the TP151 Asphalt mixture with high modulus of stiffness (VMT).

KEYWORDS

High modulus asphalt mixtures, reclaimed asphalt pavement (RAP), bitumen, crumb rubber modified bitumen, stiffness, fatigue, frost cracks.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Daniel Horáček *Návrh asfaltové směsi s použitím 30 % asfaltového recyklátu a její posouzení funkčními zkouškami*. Brno, 2018. 60 s., 15 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22.5.2018

.....
podpis autora
Daniel Horáček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Janu Kudrnovi, CSc. za odborné vedení a poskytnuté materiály při vypracování této práce. Děkuji pracovníkům silniční laboratoře centra AdMaS za poskytnuté rady a materiály, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Dále bych chtěl poděkovat všem pracovníkům v laboratoři na Ústavu pozemních komunikací, kteří mi pomohli a poradili při provádění některých zkoušek. Děkuji také zaměstnancům firmy CONSULTTEST s.r.o., protože se postarali o extrakci pojiva z R-materiálu a firmě COLAS a.s., která umožnila odběr R-materiálu na jejich obalovně. V neposlední řadě chci moc poděkovat své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Cíle práce	12
3. Teoretický rozbor problematiky.....	13
3.1 R-materiál.....	13
3.1.1 Důvody pro recyklaci	13
3.1.2 Druhy recyklace netuhých vozovek	14
3.1.3 Porovnání používání R-materiálu u nás a v zahraničí.....	15
3.3 Směs typu VMT	17
3.3.1 Užití směsi typu VMT v konstrukci vozovky	17
3.3.2 Tloušťky vrstev	18
3.4 Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem	18
3.4.1 Pryžový granulát	18
3.4.2 Použití CRmB v konstrukci vozovky.....	18
4. Použité zkušební metody.....	19
4.1 Homogenizace, kvartace	19
4.1.1 Homogenizace.....	19
4.1.2 Kvartace	19
4.2 Sítový rozbor.....	20
4.3 Stanovení penetrace jehlou	21
4.4 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička	22
4.5 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltu pomocí průhybového trámečkového reometru BBR	23
4.6 Laboratorní výroba směsi.....	25
4.7 Hutnění zkušebních těles rázovým zhutňovačem	26
4.8 Stanovení maximální objemové hmotnosti.....	27
4.9 Hutnění desek segmentovým zhutňovačem	28
4.10 Stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles.....	30
4.11 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí	31
4.12 Stanovení tuhosti – Zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR)	32
4.13 Stanovení odolnosti vůči únavě	33
5. Praktická část: Použité materiály	34

5.1 R-materiál.....	34
5.1.1 Asfaltové pojivo z R-materiálu	35
5.1.2 Kamenivo z R-materiálu	36
5.2 Kamenivo	37
5.3 Asfaltové pojivo ve směsi	38
5.3.1 Množství asfaltového pojiva	38
5.3.2 Vlastnosti asfaltového pojiva	38
6. Praktická část: Návrh asfaltové směsi.....	41
6.1 Zrnitost	41
6.2 Vlastnosti jednotlivých směsí	42
6.3 Obsah a druh asfaltu.....	43
6.4 Vlastnosti asfaltové směsi	43
7. Výsledky prováděných zkoušek.....	44
7.1 Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost a optimalizace množství pojiva	44
7.2 Objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění zkušebních desek.....	45
7.3 Stanovení nízkoteplotních vlastností.....	46
7.4 Stanovení modulu tuhosti.....	47
7.4.1 Obroušené trapezoidy.....	48
7.4.2 Neobroušené trapezoidy.....	50
7.5 Stanovení odolnosti vůči únavě	51
8. Závěr	53
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
SEZNAM OBRÁZKŮ	58
SEZNAM TABULEK.....	59
SEZNAM GRAFŮ.....	60
SEZNAM PŘÍLOH.....	61

1. Úvod

Vzhledem k neustále vzrůstající automobilizaci a tím i vyššímu zatěžování pozemních komunikací, rostou nároky na rekonstruování a výstavby nových silnic. Vybouraný a vyfrézovaný materiál ze starých krytů vozovek, tzv. R-materiál, se hromadí na skládkách a do nových směsí se používá jen v omezeném množství. Asfaltu jakožto nerostné suroviny z globálního hlediska neustále ubývá, proto je namístě se zabývat návrhem nových směsí s použitím recyklovaných materiálů.

V rámci méj bakalářské práce se zabývám návrhem nové asfaltové směsi VMT 16 z asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem. V této směsi bude obsaženo 30 % R-materiálu.

Směsi typu VMT se u nás běžně používají do ložních a podkladních vrstev vozovek s vyšším dopravním zatížením. V zahraničí (např. Švýcarsko, Francie) je použití asfaltových směsí typu VMT velmi rozšířené. Tyto státy jsou známé tím, že do těchto směsí používají až 60 % R-materiálu. [22]

Pro směs typu VMT je charakteristické:

- vysoký modul tuhosti v kombinaci s vysokou odolností vůči únavě;
- dlouhá životnost;
- vyšší obsah tvrdých asfaltů;
- vysoká odolnost proti působení vody.

Přidání 30 % R-materiálu nám zaručí obsah tvrdšího asfaltu ve směsi a ušetření celkových nákladů na směs za dražší kamenivo. Použití asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem zajistí vysokou odolnost vůči únavovým a mrazovým trhlinám a vysoký modul tuhosti.

Výhody navržené směsi:

- použití recyklovaných materiálů (R-materiál, pryž z pneumatik);
- šetrnost k životnímu prostředí;
- uvolnění místa na skládkách.

2. Cíle práce

V teoretické části práce bylo cílem popsat problematiku navrhování směsí typu VMT a použití recyklovaných materiálů do těchto směsí. V této části jsem také rozebral jednotlivé zkoušky, které byly při návrhu a výrobě použity.

V praktické části bylo cílem navrhnout a laboratorně připravit asfaltovou směs typu VMT 16 s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem a přidáním 30 % R-materiálu o zrnitosti do 11 mm. Na takto navržené směsi jsem ověřit vlastnosti vybranými funkčními zkouškami. Těmi jsou:

- stanovení nízkoteplotních vlastností (dle kap. 4.11);
- stanovení tuhosti (dle kap. 4.12);
- stanovení odolnosti vůči únavě (dle kap. 4.13).

V závěru je posouzena navržená asfaltová směs porovnáním výsledných hodnot funkčních vlastností s TP 151 (Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)).

3. Teoretický rozbor problematiky

Tato řešeršní část se zabývá rozbohem problematiky týkající se asfaltových směsí, kameniva, R-materiálu a celkově návrhu asfaltových směsí typu VMT.

3.1 R-materiál

R-materiál je asfaltová směs dle ČSN EN 13108-8 [21] znovuzískaná frézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby, upravená následně tříděním (případně drcením) a homogenizací, která se přidává do asfaltové směsi. [1]

3.1.1 Důvody pro recyklaci

- Zachování materiálových a energetických zdrojů:
 - materiálové (kamenivo, asfalt);
 - energetické (pohonné hmoty, topná média atd.).
- Energetické:
 - při získávání kameniva.
- Ochrana životního prostředí:
 - redukce skleníkových plynů (zejména CO₂);
 - snížení znečištění ovzduší;
 - omezení skládek.
- Ekonomický přínos:
 - snížení nákladů;
 - snížení zatížení komunikací;
 - zkrácení doby výstavby. [2]

Z dlouhodobého hlediska cena ropy stále stoupá, proto je na místě přidávat R-materiál v co nejvyšší míře do nových směsí. V grafu č.1 je znázorněn vývoj ceny ropy od roku 1946 až do roku 2014. Aktuální cena ropy je přibližně 77 \$/bbl.



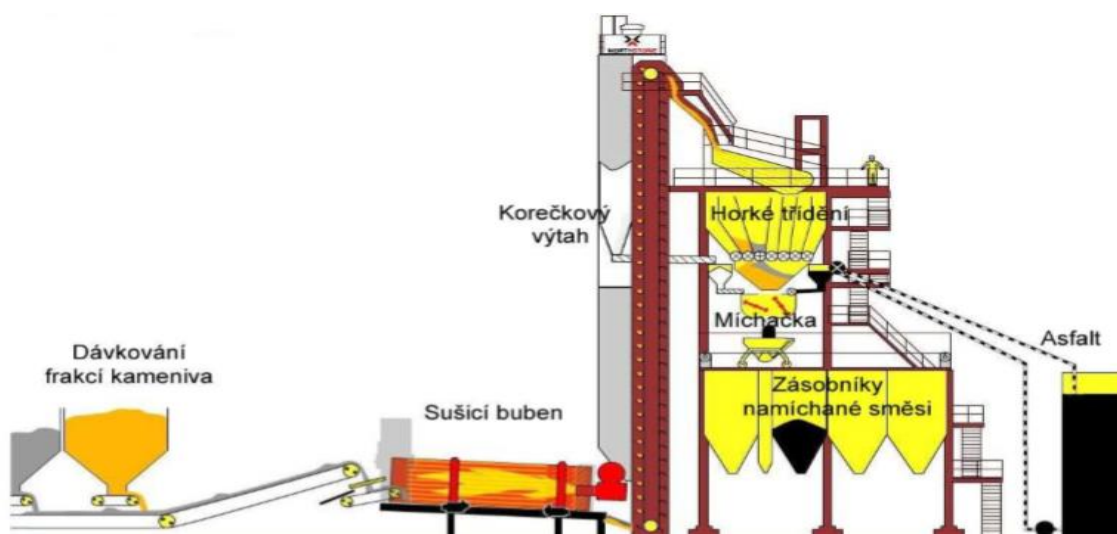
Graf 1: Vývoj ceny ropy (v rozmezí let 1946-2014) [3]

3.1.2 Druhy recyklace netuhých vozovek

Jednotlivé recyklace se dají rozdělit podle místa provádění na recyklace na místě (in place) nebo na recyklace v míchacím centru (in plant), což může být např. obalovna. Dalším hlediskem, podle kterého se recyklace dělí, je teplota provádění. Podle teploty známe recyklaci za studena nebo recyklaci za horka.

3.1.2.1 Recyklace v míchacím centru za horka

Tento způsob zpracování R-materiálu je velmi efektivní. Dá se rozdělit na 3 druhy podle způsobu přidání R-materiálu do směsi. První dva způsoby se týkají šaržové obalovny a třetí kontinuální obalovny.



Obrázek 1: Schéma šaržové obalovny [2]

A. Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny

V ČR nejpoužívanější způsob přidávání R-materiálu při míchaní. Tato technologie je velmi jednoduchá, protože není třeba nahřívat, ani jinak ošetřovat přidávaný R-materiál. Pouze kamenivo se nahřívá na vyšší teplotu. Často nastává problém s vlhkostí R-materiálu, protože bývá uskladněn v nezastřešených skládkách. Dávkování přímo do míchačky se používá u směsí s navrženým obsahem R-materiálu do 25 %.

B. Předehtřívání R-materiálu v paralelním bubnu

Jedná se o metodu, kdy se do míchačky šaržové obalovny dávkuje již předehtřátý R-materiál. To umožňuje přidání vyššího množství R-materiálu (např. v Německu až 80 %). V ČR je jen málo šaržových obaloven vybavených paralelním ohřívacím bubnem, proto tato technologie není tolik rozšířená.

C. Metoda Drum-mix

Tato metoda je velmi rozšířená v USA. Jedná se o přidávání R-materiálu do míchačky kontinuálních obaloven. U nás je převaha šaržových obaloven, proto není tato metoda tolik rozšířena. Existují 3 způsoby přidávání R-materiálu:

- přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu;
- přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu;
- separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce.

3.1.3 Porovnání používání R-materiálu u nás a v zahraničí

V následující tabulce je shrnuto používání R-materiálu v roce 2016 ve vybraných zahraničních státech a pro porovnání i v České Republice. Data jsou získána ze zprávy Asphalt in Figures 2016, kterou vydává organizace EAPA. [5] Je zde uvedeno celkové množství získaného R-materiálu, procentuální podíly jeho využití pro jednotlivé technologie recyklace a podíl nevyužitého R-materiálu, uskladněného na skládkách.

Státy	Získané množství R-materiálu [tisíce t]	Procentuální podíl R-materiálu v technologiích [%]			Podíl R-materiálu umístěného na skládce či pro jiné aplikace [%]
		Recyklace za horka (za tepla)	Recyklace za studena	Použití do nestmelených směsí	
Belgie	1240	81	-	-	-
ČR	1800	17	30	20	33
Francie	6370	70	-	-	-
Itálie	9000 ¹⁾	20 ¹⁾	30 ¹⁾	20 ¹⁾	30 ¹⁾
Německo	12000	87	-	13	0
Nizozemsko	4431	71	11	0	18
Rakousko	1400	40	-	-	-
Švédsko	1600 ¹⁾	84 ¹⁾	5 ¹⁾	5 ¹⁾	0 ¹⁾
Velká Británie	3250	80	-	-	-
USA	74200	94	0	4	2

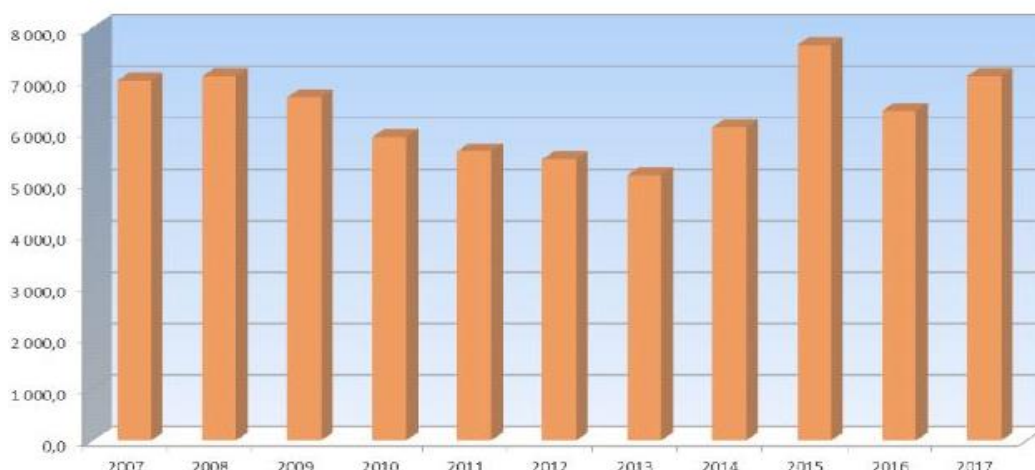
Pozn.: 1) Uvedené hodnoty jsou odhad

Tabulka 1: Používání R-materiálu v ČR a v zahraničí [5]

V ČR se v roce 2017 přibližně 7 000 000 tun asfaltových směsí. Oproti roku 2016 se tak jedná o více než 670 00 tun navíc, což činí nárůst přibližně o 10,4 %. Následující tabulka a graf zobrazují vývoj výroby asfaltových směsí v letech 2007-2017. [6]

Rok	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Tis. Tun	6985	7077	6668	5897	5617	5460	5153	6083	7682	6403	7078

Tabulka 2: Výroba asfaltových směsí v letech 2007-2017 [6]



Graf 2: Výroba asfaltových směsí v letech 2007-2017 [6]

3.3 Směs typu VMT

Směsi označované jako VMT (v dříve platném předpisu TP 151 z roku 2001 jako “VMT A“) jsou za horka zpracováváné asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti, s relativně vyšším obsahem asfaltů tvrdších druhů (popř. dalších ztužujících přísad), nízkou mezerovitostí pro podkladní vrstvy a upravenou mezerovitostí pro ložní vrstvy. U těchto druhů směsí je nutné prokázat vlastnosti funkčním způsobem (kombinace všeobecných požadavků a funkčních požadavků) podle koncepce evropských norem pro asfaltové směsi řady ČSN EN 13108. Podle zrnitosti použité směsi kameniva se rozdělují směsi VMT na druhy 0/16 a 0/22. [1]

3.3.1 Užití směsi typu VMT v konstrukci vozovky

Směsi a úpravy typu VMT lze obecně použít pro podkladní a ložní vrstvy vozovek všech tříd dopravního zatížení. Mají se použít především na vozovkách s velkým dopravním zatížením (třída dopravního zatížení S, I, II a v úsecích s pomalou a zastavující dopravou), zejména na nestmelených podkladních vrstvách. U vozovek s menším dopravním zatížením je použití VMT vhodné pouze v odůvodněných případech. Při pokládce směsi VMT na nestmelené vrstvy je třeba věnovat náležitou pozornost rovnosti povrchu, aby se omezilo nebezpečí nadměrného lokálního snížení tloušťky vrstvy VMT. Před pokládkou vrstvy VMT se musí provést vždy spojovací postřik dle ČSN 73 6129. [1]

3.3.2 Tloušťky vrstev

Projektovaná tloušťka ložní vrstvy zrnitosti 0/16 musí být v rozmezí 50-80 mm, v případě zrnitosti 0/22 v rozmezí 60-100 mm. [1]

3.4 Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem

Skládá se ze silničního asfaltu, pryžového granulátu a případně dalších přísad připravené v mísícím zařízení. Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem se také zkráceně označuje CRmB (z angl. crumb rubber modified bitumen). CRmB se s výhodou použije do vrstev se zvýšenými nároky na odolnost vůči vzniku únavových, mrazových a reflexních trhlin. Množství pryže přidané do asfaltu se dávkuje podle toho, kdy nám zaručí požadovanou viskozitu.

3.4.1 Pryžový granulát

Jako pryžový granulát se označuje odpadní pryž (ojeté pneumatiky) zbavená příměsí kordu a upravená mechanicky drcením a mletím, popř. kalandrováním. [4] Pryžový granulát zvýší viskozitu asfaltu a zlepší jeho vlastnosti. Pojivo získá pružnost, odolnost vůči vysokým a nízkým teplotám a také proti únavě.

3.4.2 Použití CRmB v konstrukci vozovky

Asfaltová směs s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem se používá pro obrusné a podkladní vrstvy. S ohledem na třídu komunikace není použití nijak omezeno. Používají se s výhodou v místech:

- pro snížení hluku způsobeného silničním provozem;
- požadovaného snížení tloušťky obrusné vrstvy, k provedení tenkých krytů, k překrytí povrchových vad obrusných vrstev a nehomogenních obrusných vrstev opatřených vysprávkami a trhlinami utěsněnými zálivkami;
- v obrusných i podkladních vrstvách pro omezení prokopírování reflexních trhlin nebo pro snížení celkové tloušťky asfaltových vrstev včetně překrytí vozovky s cementobetonovým krytem nebo vozovky z dílců (panelů). [4]

4. Použité zkušební metody

V rámci této práce bylo použito mnoho zkušebních postupů. V následujících kapitolách jsou jednotlivé použité metody popsány a stručně charakterizovány.

4.1 Homogenizace, kvartace

Provádí se podle normy ČSN EN 932-1 [8] Zkoušení všeobecných vlastností kameniva – Část 1: Metody odběru vzorků.

4.1.1 Homogenizace

Byla provedena na R-materiálu pro získání reprezentativního vzorku. Nejprve jsem si vysypal cca 50 kg R-materiálu na čistý povrch. Z různých míst jsem odebíral materiál a přemisťoval jej postupně na jiné místo. Zde postupně vznikala nová hromada tvaru kužele. Tento postup jsem 3x zopakoval a tím jsem dosáhl promíchání R-materiálu.

4.1.2 Kvartace

Kvartace vzorku byla provedena z důvodu zmenšení množství původního materiálu na zkušební navážku. Postup kvartace byl takový, že jsem si vzorek ve tvaru kužele nejprve zploštil a pak rozčtvrtil na stejné díly a dvě diagonální čtvrtiny jsem oddělal. Zbytek jsem přesunul na novou hromádku a postup jsem opakoval. Výsledkem byly dvě zkušební navážky.



Obrázek 2: Kvartace R-materiálu



Obrázek 3: Kvartace R-materiálu

4.2 Sítový rozbor

Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 933-1+A1 [9] Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor.

Tato zkouška slouží ke stanovení zrnitosti kameniva. Vzorek kameniva je roztržěn do několika frakcí pomocí zkušebních sít. Zbytky na sítích se váží a hmotnost se porovnává s celkovou hmotností kameniva.

V rámci mé bakalářské práce jsem provedl sítový rozbor na kamenivu z R-materiálu, na dvou zkušebních navážkách. Kamenivo bylo nejprve proplavováno přes síto o velikosti oka 0,063 mm a ochranné síto (1-2 mm), pro odstranění jemných částic. Zůstatky na sítích byly poté vysušeny v sušárně.

Po důkladném vysušení kameniva jsem přistoupil k prosévání. Protože použitý R-materiál byl frakce do 11 mm, použil jsem síta o velikosti ok 11 mm; 8 mm; 5,6 mm; 4 mm; 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,125 mm a 0,063 mm. Po prosetí, jsem jednotlivé zbytky na sítích zvážil a tyto hodnoty si zaznamenal. Hmotnosti na sítích jsem poté porovnával s celkovou hmotností kameniva. Výsledkem je čára zrnitosti kameniva. Výsledná čára zrnitosti kameniva je průměrem čar zrnitosti ze dvou zkoušených vzorků.



Obrázek 4: Prosévací přístroj

4.3 Stanovení penetrace jehlou

Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 1426 [10] Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Tato zkouška spočívá v měření hloubky vniknutí penetrační jehly do vzorku asfaltu při teplotě 25 °C.

Extrakci a znovuzískání asfaltu z R-materiálu k této bakalářské práci zařídila laboratoř firmy CONSULTEST s.r.o.

Na zkušebních vzorcích asfaltu byly měřeny vždy min. 3 hloubky vpichu penetrační jehly. Celková penetrace je průměr z těchto tří měření zaokrouhlená na celé číslo, přičemž bylo splněno podmínky, že se od sebe jednotlivé penetrace neliší o více než 2 penetrační jednotky.



Obrázek 5: Přístroj pro stanovení penetrace jehlou

4.4 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička

Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 1427 [11] Asfalty a asfaltová pojiva – Metoda kroužek a kulička. Touto zkouškou stanovíme teplotu, při které kulička (předepsaných rozměrů) propadne kroužkem a asfaltové pojivo se protáhne na vzdálenost 25,0 mm.

Tuto zkoušku jsem provedl na znovuzískaném asfaltu z R-materiálu a poté znovu na asfaltu z R-materiálu, ale smíchaném s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. Výsledky z této zkoušky jsou uvedeny v tabulce a porovnány.



Obrázek 6: Přístroj pro stanovení bodu měknutí



Obrázek 7: Směs asfaltu z R-materiálu s CRmB po nalití do forem



Obrázek 8: Asfalt vyextrahovaný z R-materiálu po nalití do forem

4.5 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltu pomocí průhybového trámečkového reometru BBR

Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 14771 [12] – Asfalty a asfaltová pojiva-Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR). Zkouška spočívá v měření průhybu, při tříbodovém ohybu trámečku asfaltového pojiva. Během této funkční zkoušky se střed trámečku zatěžuje konstantní silou 0,98 N (100 g) po dobu 4 minut.

Cílem této zkoušky je stanovit modul tuhosti za ohybu S a m -hodnotu v čase 60 s od počátku zatěžování. Díky těmto hodnotám lze určit tzv. kritickou teplotu. Jedná se o teplotu, kdy modul tuhosti dosahuje hodnoty 300 MPa, resp. m -hodnota dosahuje hodnoty 0,3. Z této kritické teploty lze stanovit teplotu, při které mohou vznikat ve

vozovce mrazové trhliny. Dle amerického výzkumu SHRP je tato teplota o 10 °C nižší než kritická teplota.

Celkem jsem stanovil modul tuhosti za ohybu na 3 sadách zkušebních trámeček při teplotách -16, -22 a -28 °C. Z jednotlivých výsledků pak byla stanovena kritická teplota.



Obrázek 9: Průhybový trámečkový reometr



Obrázek 10: Zkušební trámeček ve formě pro zkoušku na BBR

4.6 Laboratorní výroba směsi

Výroba směsi probíhala dle normy ČSN EN 12697-35+A1 [13] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi. Tato norma se zabývá výrobou asfaltové směsi v laboratoři pomocí strojní míchačky, nebo ručního míchání. Jsou zde také stanoveny teploty míchání a sušení.

Nejprve jsem si vysušil všechny potřebné frakce kameniva a R-materiál v laboratorní sušárně. Po vysušení jsem navážil jednotlivé frakce kameniva a R-materiál na potřebné navážky, které odpovídaly jednotlivým dávkám asfaltové směsi. R-materiál byl následně nahřán na teplotu 110 °C a kamenivo na teplotu 178 °C. Po nahřátí bylo smícháno kamenivo s R-materiálem (teplota byla cca 155 °C). Následně byla tato směs ohřáta na teplotu míchání s CRmB, která byla 175 °C. Po nahřátí byla směs kameniv s R-materiálem smíchána s CRmB.



Obrázek 11: Vyrobená asfaltová směs pro výrobu zkušebních těles

4.7 Hutnění zkušebních těles rázovým zhutňovačem

Tato metoda byla provedena podle normy ČSN EN 12697-30+A1 [14] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Tato norma se zabývá zhutňováním asfaltových směsí rázovým zhutňovačem. Rázový zhutňovač slouží pro výrobu zkušebních těles, na kterých se zjišťuje zejména objemová hmotnost. Pěch rázového zhutňovače dopadá na směs v ocelové formě z předepsané výšky a hutní ji předepsaným počtem nárazů. Tělesa vzniklá tímto hutněním se nazývají Marshallova tělesa.

Hutnění probíhalo tak, že nejprve jsem namíchanou asfaltovou směs vsypal do připravené ocelové formy předepsaných rozměrů. Vsypání jsem provedl po třetinách, přičemž po každém usypání do formy jsem srovnal povrch. Takto připravený vzorek ve formě byl vložen pod hutnící pěch rázového zhutňovače. Hutnění bylo provedeno celkem 2x50 ti úderů pěchu, tj. z každé strany tělesa 50 úderů.

Celkem jsem vyrobil 3 sady po třech Marshallových tělesech s různými obsahy asfaltu. Obsah asfaltu byl 5,8 %, 6,2 % a 6,6 %.

Marshallova tělesa byla zvážena, změřeny jejich rozměry a bylo posouzeno, zda odpovídají předepsaným rozměrům (tj. tloušťka $63,5 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$). Následně jsem stanovil objemové hmotnosti těles.



Obrázek 12: Marshallova tělesa



Obrázek 13: Rázový zhutňovač

4.8 Stanovení maximální objemové hmotnosti

Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 12697-5+A1 [15] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Tato norma se zabývá stanovením maximální objemové hmotnosti nezhutněné asfaltové směsi, tj. směsi, která neobsahuje mezery.

Pro tuto práci jsem použil výpočet maximální objemové hmotnosti volumetrickým způsobem, tj. stanovení objemové hmotnosti pomocí pyknometrů. Jako rozpouštědlo jsem použil perchlorethylen.

Byla stanovena maximální objemová hmotnost 3 vzorků s různým obsahem asfaltového pojiva (5,8 %, 6,2 % a 6,6 %). Výsledky sloužily mimo jiné k výpočtu mezerovitosti směsi.



Obrázek 14: Pyknometry s asfaltovou směsí

4.9 Hutnění desek segmentovým zhutňovačem

Hutnění bylo prováděno dle normy ČSN EN 12697-33+A1 [16] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. Tato norma se zabývá hutněním desek segmentovým zhutňovačem do ocelové formy předepsaných rozměrů. Vzniknou tak desky určené přímo pro zkoušení či pro vyřezání zkušebních těles. Segmentový zhutňovač simuluje reálné hutnění na stavbě.

Před hutněním jsem si stanovil potřebnou navážku pro výrobu jedné desky a toto množství jsem si namíchal v laboratorní míchačce. Připravenou a zahřátou směs na teplotu hutnění jsem vsypal do ocelové formy zhutňovače. Rovnoměrně jsem rozprostřel směs ve formě pomocí následně provedl zhutnění této směsi.



Obrázek 15: Segmentový zhutňovač



Obrázek 16: Navážka v laboratorní míchačce

4.10 Stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Tato zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12697-6+A1 [17] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro provádění asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa.

V normě je uvedeno několik způsobů určení objemové hmotnosti. Pro moji bakalářskou práci jsem si vybral postup „Nasycený suchý povrch (SSD)“. Podstatou tohoto postupu je stanovení objemové hmotnosti z hmotností suchého tělesa, tělesa pod vodou a tělesa osušeného po saturaci ve vodě. Pro určení objemové hmotnosti je také potřeba znát teplotu vody, v které bylo těleso saturováno, z čehož lze spočítat její hustota.

Objemovou hmotnost jsem stanovil na všech zkušebních deskách. Podle spočítané objemové hmotnosti jsem následně ověřil míru zhutnění asfaltové směsi.



Obrázek 17: Zkušební asfaltová deska

4.11 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí

Tato zkouška se provádí dle normy ČSN EN 12697-46 [18] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. Hlavní podstatou zkoušky je udržování konstantní délky zkušebního tělesa tvaru kvádru při současném poklesu teploty vzorku konstantní rychlostí. Tím v tělese vzniká tzv. kryogenní napětí, jež neustále narůstá až do porušení tělesa.

Pro moji bakalářskou práci jsem použil metodu nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST).

Ze zkušební desky jsem si vyřezal 3 zkušební tělesa předepsaných rozměrů (50 mm x 50 mm x 200 mm). Tato tělesa byla zkoušena pomocí laboratorního přístroje CYKLON-40, kterým se stanovují nízkoteplotní vlastnosti.



Obrázek 18: Přístroj CYKLON-40

4.12 Stanovení tuhosti – Zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR)

Provádí se podle normy ČSN EN 12697-26 [19] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost. Zkušební těleso je deformováno v rozsahu lineárního přetvoření. Při této zkoušce se měří amplituda napětí a poměrného přetvoření spolu s fázovým úhlem mezi napětím a poměrným přetvořením, při deformování zkušebního tělesa tvaru komolého jehlanu.

Pro tuto zkoušku jsem použil zkušební zařízení COOPER v budově výzkumného centra AdMaS Fakulty stavební. Navržená asfaltová směs byla testována při teplotách -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C a 40 °C a frekvencích zatěžování 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz a 30 Hz. Na obr.19 je zachyceno zkušební zařízení COOPER, kde byly vzorky testovány.



Obrázek 19: Zařízení COOPER pro stanovení tuhosti asfaltových směsí

4.13 Stanovení odolnosti vůči únavě

Tato zkouška se provádí dle normy ČSN EN 12697-24 [20] a stanovuje se odolnost asfaltových směsí vůči únavě v závislosti na konstantním poměrném přetvoření zkušebního tělesa. Zkušební těleso je unavené tehdy, když klesne jeho modul tuhosti na polovinu (tj. v tělese se započnou šířit trhliny). Rychlost unavení vzorku závisí na nastaveném počátečním poměrném přetvoření. Výsledkem zkoušky je pak grafické vyjádření v tzv. Wöhlerově diagramu, kde je zobrazena závislost počtu cyklů do unavení na počátečním poměrném přetvoření tělesa – vše v logaritmickém měřítku. Naměřené hodnoty jsou pak proloženy přímkou a ze sklonu této přímky lze zjistit počáteční poměrné přetvoření ϵ pro unavení zkušebních těles při hodnotě 1 000 000 zatěžovacích cyklů, což vyjadřuje odolnost asfaltové směsi vůči únavě. Při zkoušce se používá zkušební teplota 10 °C a frekvence zatěžování 25 Hz. Tato zkouška se provádí na 18 zkušebních tělesech tvaru trapezoidu. [20]



Obrázek 20: Porušený vzorek po zkoušce

5. Praktická část: Použité materiály

V této kapitole se budu zabývat materiály, které byly použity pro výrobu asfaltové směsi.

5.1 R-materiál

R-materiál použitý pro účely bakalářské práce byl odebrán z nezastřešených skládek v areálu obalovny firmy COLAS CS, a.s. v obci Holubice. Jedná se o R-materiál o maximální velikosti zrna kameniva do 11 mm. Pro stanovení vlastností R-materiálu bylo nutné provést extrakci a znovuzískání pojiva. Toto pro účely bakalářské práce zajistila zkušební laboratoř firmy CONSULTTEST s.r.o. Extrakce pojiva byla provedena na dvou vzorcích z řádně homogenizovaného materiálu (dle kap. 4.1). Na dvou obdržených vzorcích kameniva jsem potom provedl síťový rozbor a asfalt z extrakce byl sloučen do jednoho vzorku, na kterém byly provedeny další zkoušky. Na obr. 21 lze vidět připravené zkušební vzorky R-materiálu po homogenizaci a kvartaci. Na obr. 22 je zachyceno místo odběru R-materiálu pro účely této práce.



Obrázek 21: Vzorky R-materiálu po kvartaci



Obrázek 22: Uskladnění R-materiálu v Holubicích

5.1.1 Asfaltové pojivo z R-materiálu

5.1.1.1 Množství pojiva v R-materiálu

Po extrakci dvou vzorků R-materiálu bylo zjištěno množství asfaltového pojiva 4,33 % a 4,67 %. Výsledné množství asfaltového pojiva v R-materiálu bylo stanoveno jako průměr těchto dvou množství, tedy 4,5 %.

5.1.1.2 Vlastnosti asfaltového pojiva

Na vyextrahovaném asfaltovém pojivu z R-materiálu byla stanovena penetrace (dle kap. 4.3) a také bod měknutí metodou kroužek kulička (dle kap. 4.4).

Stanovení penetrace jehlou bylo provedeno celkem 3x a výsledná hodnota je průměrem z těchto dílčích naměřených hodnot. Výsledky uvádí následující tabulka č. 3. Podrobně jsou výsledky uvedeny v příloze 2.

Asfalt vyextrahovaný z R-materiálu	Hloubka [PJ]
	12

Tabulka 3: Výsledná hloubka penetrace asfaltu z R-materiálu

Stanovení bodu měknutí bylo provedeno metodou kroužek kulička dle kapitoly 4.4. Byl stanoven bod měknutí na levé i pravé kuličce a výsledkem je průměr z těchto dvou hodnot. Výsledky uvádí následující tabulka č. 4. Podrobně jsou výsledky uvedeny v příloze 2.

Asfalt vyextrahovaný z R-materiálu	Teplota [°C]
	67,4

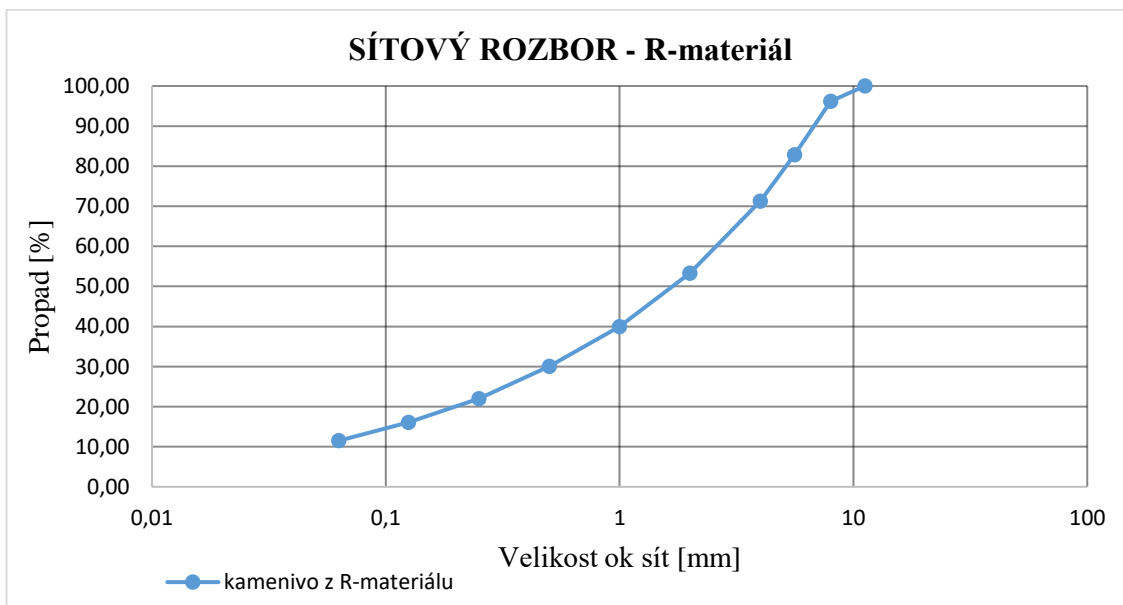
Tabulka 4: Výsledná teplota bodu měknutí asfaltu z R-materiálu

5.1.2 Kamenivo z R-materiálu

Extrakcí z R-materiálu byly získány dva vzorky kameniva, na kterých byly provedeny síťové rozbory (dle kap. 4.2). Výsledkem jsou dvě čáry zrnitosti, jejichž průměrem je výsledná čára zrnitosti kameniva z R-materiálu. Následující tabulka č. 5 a graf č. 3 uvádí výsledky síťového rozboru R-materiálu. Podrobně jsou výsledky uvedeny v příloze 1.

Kamenivo z R-materiálu	Propady na sítích [%]									
	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
	100,00	96,20	82,83	71,25	53,30	39,98	30,04	21,96	16,09	11,50

Tabulka 5: Síťový rozbor frakcí kameniva z R-materiálu



Graf 3: Čára zrnitosti kameniva z R-materiálu

5.2 Kamenivo

Pro výrobu asfaltové směsi bylo použito drcené kamenivo z kamenolomu Luleč. Výsledná směs obsahuje kamenivo frakcí 0/4, 4/8, 8/11, 8/16 a vápencovou moučku. Před navážením kameniva na výrobu směsi bylo kamenivo řádně vysušeno. Zrnitost jednotlivých frakcí kameniva je zaznamenána v kapitole 6.1.



Frakce 0/4 mm



Frakce 4/8 mm



Frakce 8/11 mm



Frakce 8/16 mm

5.3 Asfaltové pojivo ve směsi

V této kapitole je popsáno množství asfaltového pojiva použitého do navržené směsi. Dále jsou zde uvedeny vlastnosti pojiva a výsledky zkoušek provedených na smíchaném vzorku asfaltu z R-materiálu s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem.

5.3.1 Množství asfaltového pojiva

Pro výrobu směsi byl použit asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (CRmB), který byl odebrán na obalovně v polském Krakově z mísícího zařízení blender. Pro výrobu modifikovaného asfaltu byl použit asfalt gradace 70/100. Do tohoto asfaltu bylo přimícháno 16 % pryžového granulátu. Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem jsem smíchal s vyextrahovaným asfaltem z R-materiálu v poměru, který odpovídá výsledné asfaltové směsi (s 30 % podílem R-materiálu).

Poměr smíchaného asfaltového pojiva z R-materiálu a asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem:

- R-materiál obsahuje 4,5 % asfaltu → Směs obsahuje 30 % R-materiálu = **1,35 %** pojiva;
- celková směs obsahuje 6,5 % asfaltu → 1,35 % je pojivo z R-materiálu;
- množství CRmB přidané do směsi je potom $6,5 \% - 1,35 \% = \mathbf{5,15 \%}$ pojiva.

Typ asfaltu	Podíl asfaltů [%]
asfalt z R-materiálu	26,21
CRmB	73,79

Tabulka 6: Poměr obsaženého pojiva v asfaltové směsi

5.3.2 Vlastnosti asfaltového pojiva

Na takto smíchaném asfaltovém pojivu jsem stanovoval penetraci jehlou, bod měknutí a nízkoteplotní vlastnosti.

Stanovení penetrace jehlou (dle kap. 4.3) na smíchaném asfaltovém pojivu bylo provedeno celkem 3x a výsledná hodnota je průměrem z dílčím naměřených hodnot. Výsledky uvádí následující tabulka č. 7.

Asfalt vyextrahovaný z R-materiálu + CRmB	Hloubka [PJ]
	32

Tabulka 7: Výsledná hloubka penetrace smíchaného pojiva

Stanovení bodu měknutí bylo provedeno metodou kroužek kulička (dle kap.4.4). Byl stanoven bod měknutí na levé i pravé kuličce a výsledkem je průměr z těchto dvou hodnot. Výsledky uvádí následující tabulka č. 8.

Asfalt vyextrahovaný z R-materiálu + CRmB	Teplota [°C]
	67,5

Tabulka 8: Výsledná teplota bodu měknutí smíchaného pojiva

Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (dle kap. 4.5). Připravil jsem si 9 zkušebních asfaltových trámečků, které jsem odzkoušel při 3 různých teplotách (-16 °C, -22 °C a -28 °C). V následující tabulce jsem uvedl moduly tuhosti za ohybu a m-hodnoty pro jednotlivé teploty v čase 60 s od počátku zatěžování.

TEPLOTA	S _{60s}	m _{60s}
	[MPa]	[s]
-16	140,5	0,333
-22	282,4	0,277
-26	522,2	0,217

Tabulka 9: Výsledný modul tuhosti za ohybu a m-hodnota

Vynesením hodnot modulů tuhosti a m-hodnot do grafů a jejich proložením exponenciální křivkou lze stanovit kritické teploty. Tyto teploty jsou uvedeny v následující tabulce č. 10.

Zjištění teploty pro S_{60s} a m_{60s}			
	y		T [°C]
S_{60s}	25,01785	-0,10896	-22,8
m_{60s}	0,59110	0,03535	-19,2

Tabulka 10: Kritické teploty

Pro zkoušené asfaltové pojivo vyšla kritická teplota -19,2 °C, tzn. při použití tohoto asfaltu do směsi by mohly vznikat mrazové trhliny při teplotě o 10 °C nižší, tj. při -29,2 °C.

6. Praktická část: Návrh asfaltové směsi

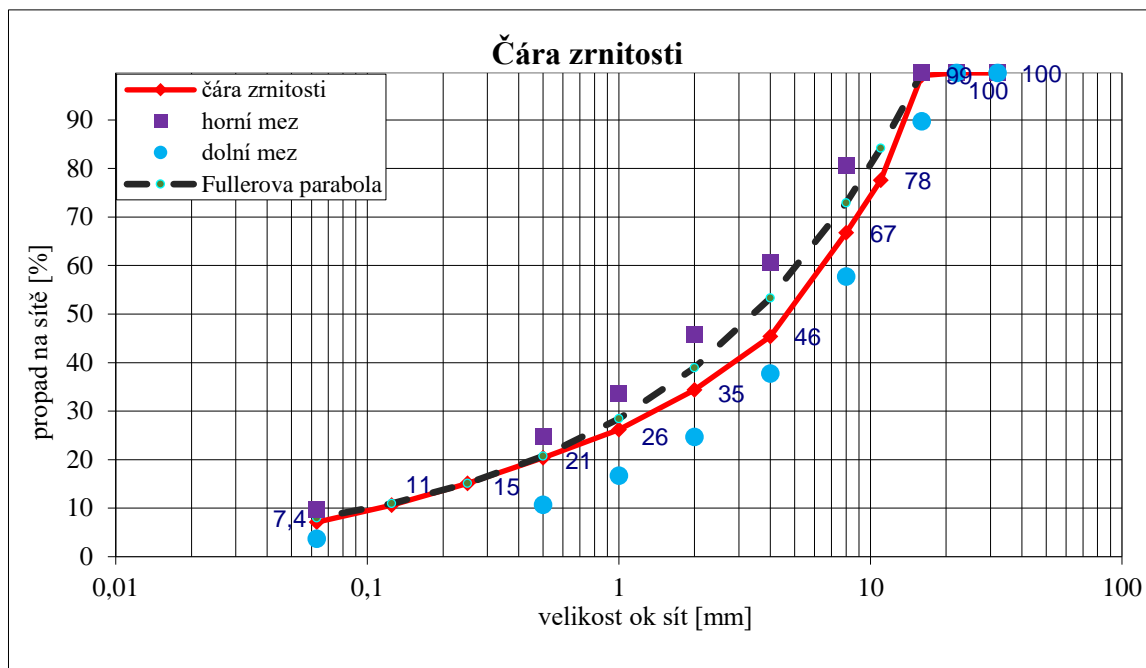
Cílem bakalářské práce je návrh asfaltové směsi VMT16 s obsahem 30 % R-materiálu a asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem (CRmB). V rámci této práce byly v silniční laboratoři vyrobeny celkem 3 asfaltové směsi, které se lišily obsahem asfaltového pojiva (5,8 %, 6,2 % a 6,6 %). Z připravených směsí byly vyrobeny zkušební tělesa. Podle vlastností získaných z empirických zkoušek bylo navrženo optimální množství pojiva.

6.1 Zrnitost

Podle Fullerovi paraboly byla navržena čára zrnitosti výsledné směsi. Tato čára zrnitosti je omezena dolní a horní mezí pro směs VMT (dle TP 151 [1]), které musí respektovat. Čára zrnitosti je stejná pro všechny 3 připravené směsi. Navržená čára zrnitosti vyhovuje požadavkům z TP 151 pro VMT 16 na horní a dolní mez. Dle zkušeností byla výsledná čára zrnitosti navržena pod Fullerovou parabolou, čímž očekáváme lepší vlastnosti asfaltové směsi. V následující tabulce č. 11 jsou uvedeny zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva, R-materiálu a výsledná zrnitost navržené směsi. V grafu č. 4 je potom znázorněna čára zrnitosti výsledné směsi a její porovnání s Fullerovou parabolou.

Čára zrnitosti	Množství ve směsi [%]	Propad na sítích [%]									
		16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8-16	24,0	97,7	15,1	2,7	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,4
8-11	8,0	100,0	78,5	8,6	2,7	1,5	1,2	1,2	1,2	1,1	0,8
4-8	14,0	100,0	100,0	91,8	5,3	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8
R-mat	30,0	100	100,0	96,2	71,3	53,3	40,0	30,0	22,0	16,1	11,5
0-4	20,0	100,0	100,0	100,0	95,4	70,5	50,0	36,0	22,0	9,5	3,2
moučka	4,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,6	95,8	76,4
dolní mez		90		58	38	25	17	11			4
horní mez		100,0		81,0	61,0	46,0	34,0	25,0			10,0
Fullerova		100,0	82,9	70,7	50,0	35,4	25,0	17,7	12,5	8,8	6,3
Navržená		99,4	77,9	67,0	45,7	34,6	26,5	20,7	15,4	10,9	7,4

Tabulka 11: Čára zrnitosti navržené směsi



Graf 4: Čára zrnitosti navržené směsi

6.2 Vlastnosti jednotlivých směsí

Na vyrobených Marshallových tělesech jsem postupně stanovil objemovou hmotnost (dle kap. 4.10), maximální objemovou hmotnost (dle kap. 4.8) a mezerovitost. Průměrné výsledky jsou níže uvedeny v tabulce.

Množství asfaltu [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Maximální objemová hmotnost [kg/m ³]	Mezerovitost [%]
5,8	2285	2453	6,8
6,2	2293	2438	5,9
6,6	2310	2418	4,5

Tabulka 12: Vlastnosti asfaltových směsí

Podle mezerovitosti jsme stanovili optimální množství asfaltu výsledné směsi na 6,5 %.

6.3 Obsah a druh asfaltu

Ve směsi je obsaženo 6,5 % asfaltového pojiva. Z toho 1,35 % zajišťuje R-materiál ve směsi a zbylých 5,15 % tvoří asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (asfalt je gradace 70/100 a obsah pryžového granulátu v asfaltu je 16 %).

6.4 Vlastnosti asfaltové směsi

V následující tabulce č. 13 jsou uvedeny vlastnosti stanovené na asfaltové směsi s 6,5 % asfaltového pojiva.

Objemová hmotnost zhutněných desek	2332 kg/m ³
Objemová hmotnost Marshallových těles	2314 kg/m ³
Maximální objemová hmotnost směsi	2433 kg/m ³
Mezerovitost	4,9 %

Tabulka 13: Vlastnosti výsledné asfaltové směsi

7. Výsledky prováděných zkoušek

7.1 Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost a optimalizace množství pojiva

První byla stanovena objemová hmotnost na třech sadách Marshallových těles, které se lišily jiným množstvím asfaltového pojiva ve směsi. Objemová hmotnost byla stanovena dle kap. 4.10. V tabulce č. 14 jsou uvedeny objemové hmotnosti jednotlivých Marshallových těles.

Množství asfaltu [%]	Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměr	Výška vzorku [mm]
5,8	I.	2281,9	2285	64,35
	II.	2289,0		64,30
6,2	I.	2315,4	2285	63,46
	II.	2268,8		65,35
	III.	2271,2		64,40
6,6	I.	2321,7	2310	63,85
	II.	2308,0		65,95
	III.	2300,1		64,40

Tabulka 14: Objemové hmotnosti Marshallovým těles

Na takto namíchaných směsích byla pomocí pyknometrů stanovena maximální objemová hmotnost dle kap. 4.8 a spočítána mezerovitost. Tato maximální objemová hmotnost a spočítaná mezerovitost je zaznamenána v tabulce č. 15.

Množství asfaltu [%]	Maximální objemová hmotnost [kg/m ³]	Mezerovitost [%]
5,8	2453	6,8
6,2	2438	5,9
6,6	2418	4,5

Tabulka 15: Maximální objemové hmotnosti směsí

Podle mezerovitosti bylo stanoveno optimální množství pojiva ve směsi na 6,5 %. S takovým množstvím pojiva byla laboratorní míchačkou připravena směs, ze které jsem vyrobil 2 zkušební Marshallova tělesa a stanovil objemovou hmotnost dle kap. 4.10, kterou jsou zaznamenal do tabulky č. 16.

Množství asfaltu [%]	Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Průměr
6,5	I.	2304	2314
	II.	2323	

Tabulka 16: Objemová hmotnost Marshallových těles výsledné směsi

Opět byla stanoveno maximální množství pojiva a spočítaná výsledná mezerovitost směsi. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 17.

Množství asfaltu [%]	Maximální objemová hmotnost [kg/m^3]	Mezerovitost [%]
6,5	2433	4,9

Tabulka 17: Vlastnosti výsledné směsi

7.2 Objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění zkušebních desek

V rámci této bakalářské práce bylo vyrobeno 6 zkušebních desek z asfaltové směsi s obsahem pojiva 6,5 %. Tato směs byla připravena v laboratorní míchačce v areálu výzkumného centra AdMaS Fakulty stavební. Na vyrobených zkušebních deskách byla postupně stanovena objemová hmotnost (dle kap. 4.10), mezerovitost a míra zhutnění. Výsledky jsem seřadil do přehledné tabulky č. 18.

Deska	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Míra zhutnění [%]	Mezerovitost [%]
1	2340	101,1	3,8
2	2334	100,9	4,1
3	2336	100,9	4,0
4	2340	101,1	3,8
5	2314	100,0	4,9
6	2328	100,6	4,3

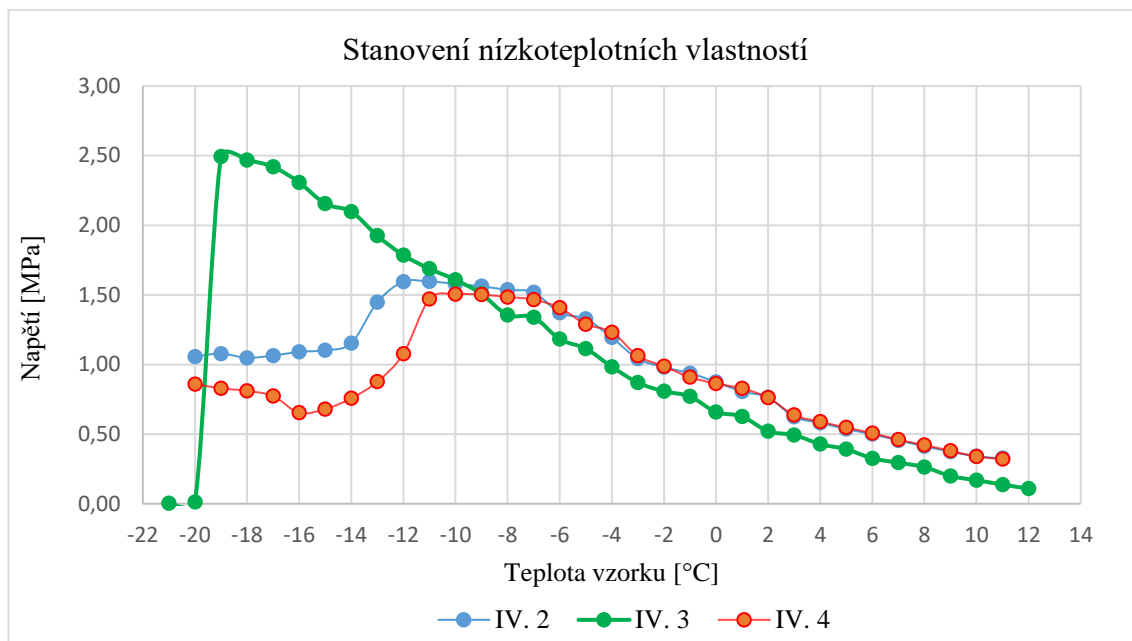
Tabulka 18: Vlastnosti zkušebních desek

7.3 Stanovení nízkoteplotních vlastností

Pro tuto funkční zkoušku byla použita deska č. 4, ze které jsem si na laboratorní pile vyřezal 3 zkušební tělesa. Tato zkouška byla provedena dle kapitoly 4.11 při počáteční teplotě temperování 10°C. Výsledky této zkoušky jsou zaznamenány v tabulce č. 19 a grafu č. 5 níže. Podle detailních výsledků uvedených v příloze, zkušební tělesa nebyla příliš homogenní (nepravidelné rozložení mezerovitosti, zkušební tělesa se při prostém tahu při snižování teploty kroutila, viz detailní protažení na 2 snímačích délky tělesa).

Vzorek	IV. 2	IV. 3	IV. 4	průměrné hodnoty
teplota vzorku při porušení [°C]	-11,7	-18,6	-10,5	-13,6
teplota v komoře při porušení [°C]	-15,4	-22,1	-14,4	-17,3
max. síla při porušení [kN]	4,18	6,49	3,82	4,83
max. napětí při porušení [MPa]	1,60	2,52	1,51	1,88

Tabulka 19: Výsledky zkoušky stanovení nízkoteplotních vlastností



Graf 5: Výsledky zkoušky stanovení nízkoteplotních vlastností



Obrázek 23: Porušený vzorek (IV. 3) po zkoušce

7.4 Stanovení modulu tuhosti

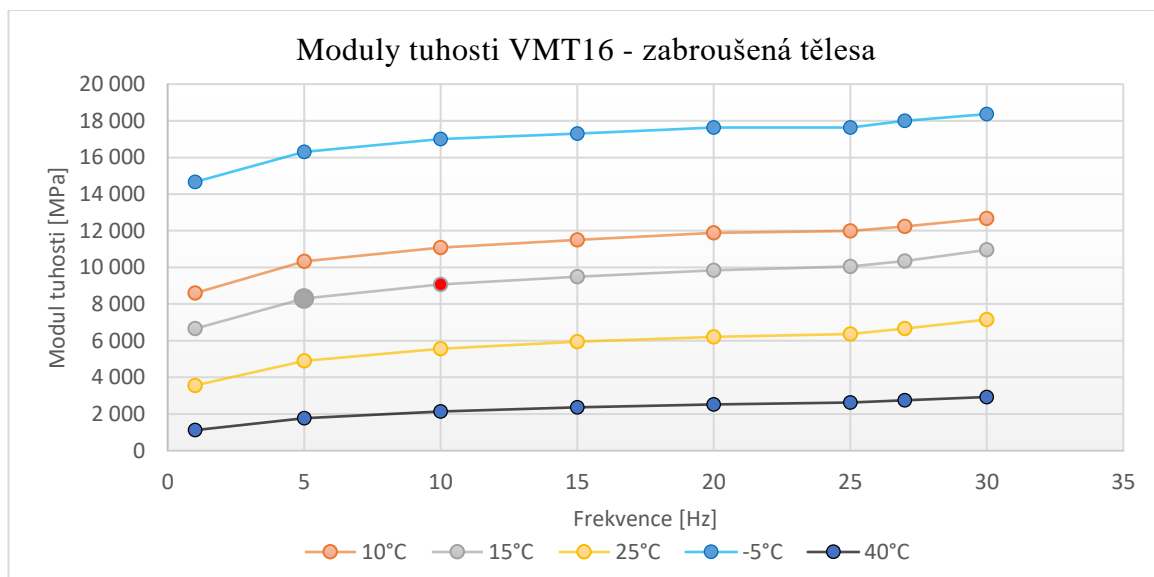
Tuto funkční zkoušku jsem prováděl na trapezoidích vyřezaných ze zkušebních desek 1,3 a 6, podle postupu uvedeného v kapitole číslo 4.12. První byl stanoven modul tuhosti na 4 nezabroušených zkušebních tělesech tloušťky 50 mm vyřezaných z desky

č. 6. Poté jsem si zbývajících 5 zkušebních vzorků zbrousil na laboratorní brusce na tloušťku 40 mm a následně jsem na nich stanovil modul tuhosti. Modul tuhosti nezabroušených těles byl stanoven na 8173 MPa (tab. 21) a modul tuhosti zabroušených těles na 9067 MPa (tab. 20). Ukázalo se tedy, že zabroušená tělesa, tzn. odstraněním povrchových pórů a nerovností, došlo ke zvýšení modulu tuhosti o cca 10,9 %. Jako finální modul tuhosti navržené asfaltové směsi byl tedy použit modul tuhosti zabroušených těles.

7.4.1 Obroušené trapezoidy

Teplota [°C]	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
-5°C	14 662	16 304	17 001	17 302	17 625	17 631	17 994	18 368
10°C	8 598	10 326	11 090	11 503	11 889	11 994	12 231	12 676
15°C	6 655	8 301	9 067	9 486	9 847	10 044	10 348	10 958
25°C	3 561	4 891	5 570	5 949	6 211	6 370	6 669	7 156
40°C	1 120	1 765	2 132	2 362	2 522	2 635	2 752	2 930

Tabulka 20: Modul tuhosti zabroušených zkušebních těles



Graf 6: Modul tuhosti zabroušených zkušebních těles



Obrázek 24: Laboratorní bruska



Obrázek 25: Upevnění těles do přístroje

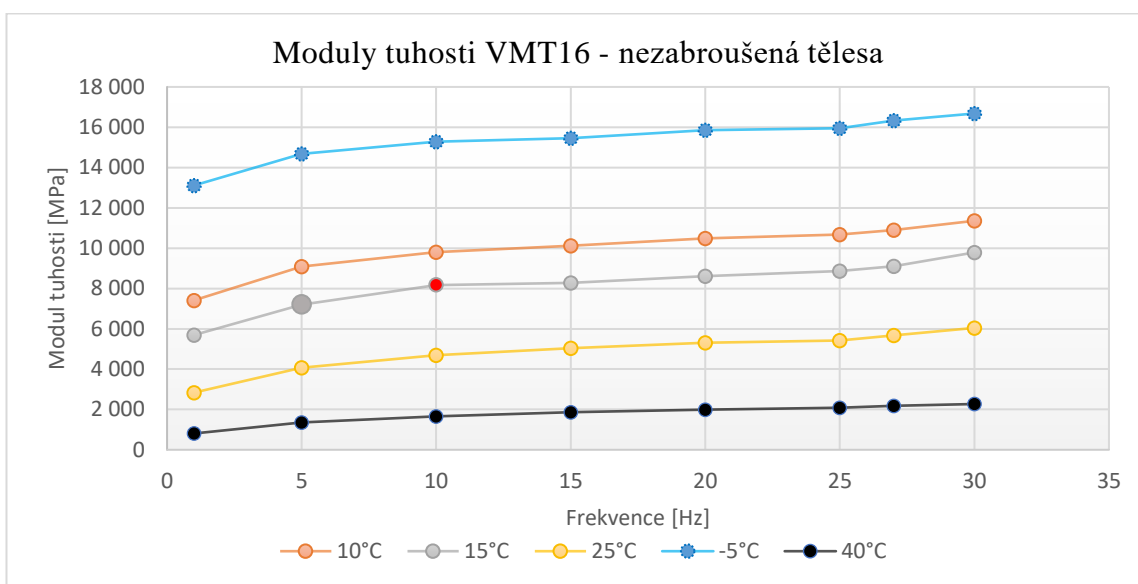


Obrázek 26: Zabroušená zkušební tělesa

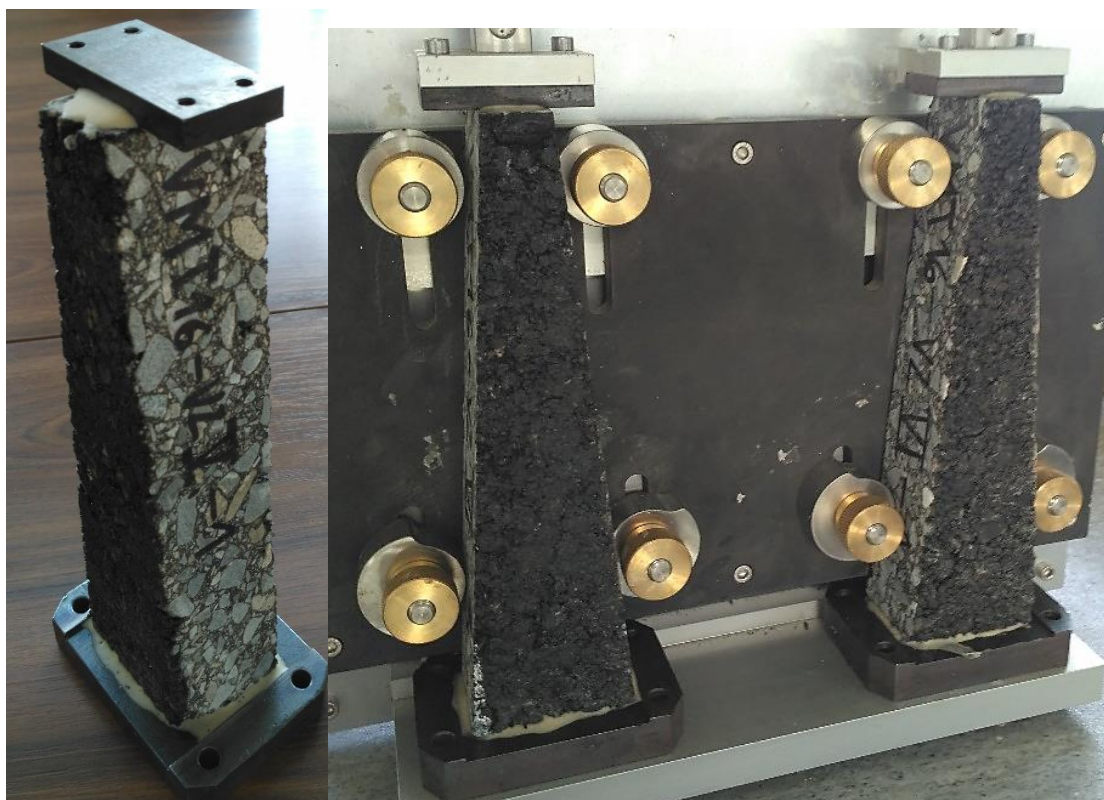
7.4.2 Neobroušené trapezoidy

Teplota [°C]	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
-5°C	13 112	14 672	15 282	15 452	15 859	15 944	16 334	16 681
10°C	7 414	9 092	9 803	10 115	10 493	10 683	10 899	11 360
15°C	5 692	7 202	8 173	8 273	8 617	8 865	9 109	9 789
25°C	2 837	4 065	4 688	5 033	5 310	5 428	5 676	6 045
40°C	808	1 352	1 653	1 858	1 985	2 084	2 174	2 270

Tabulka 21: Modul tuhosti nezabroušených zkušebních těles



Graf 7: Modul tuhosti nezabroušených zkušebních těles



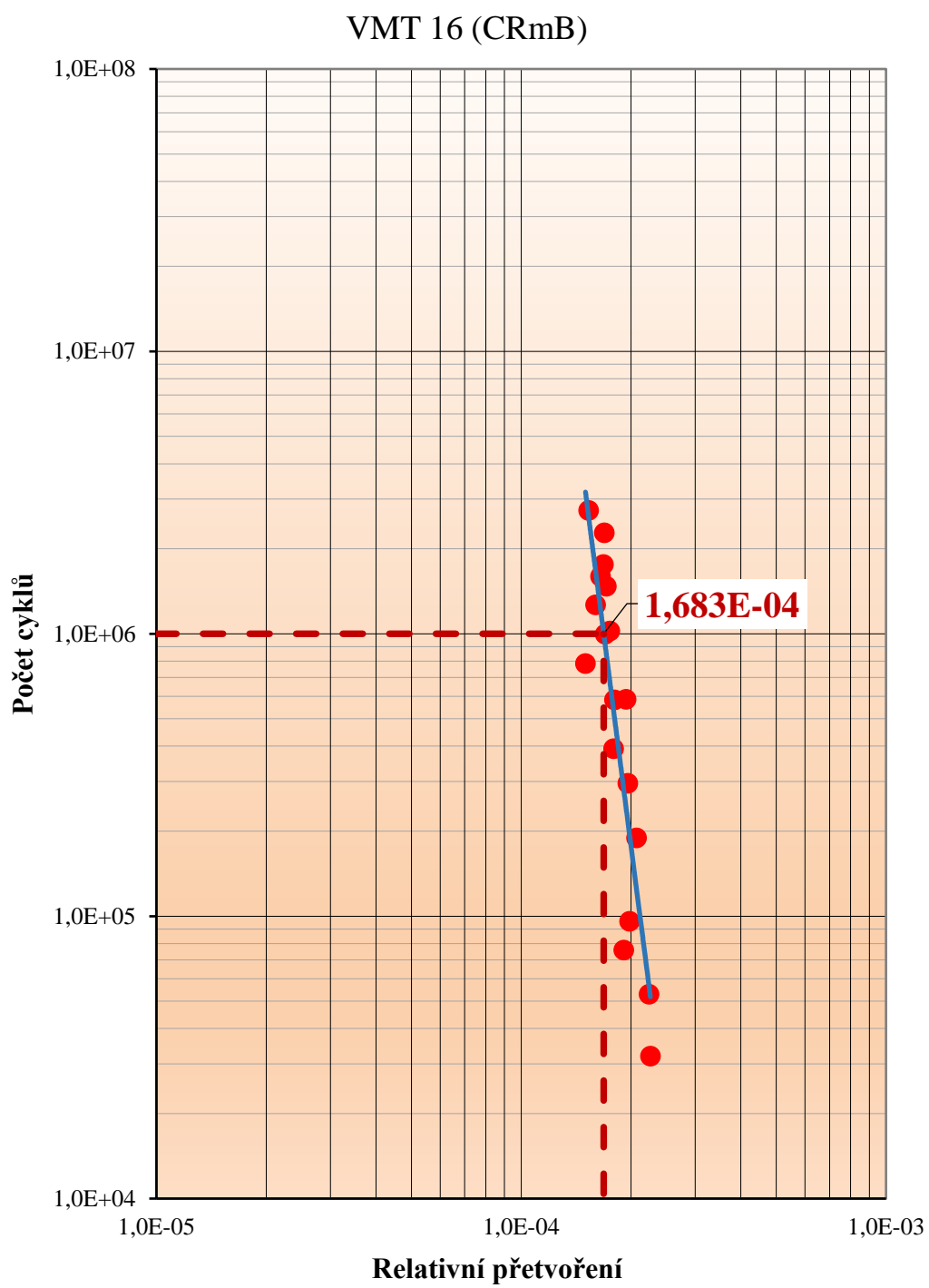
Obrázek 27: Nezabroušená zkušební tělesa

7.5 Stanovení odolnosti vůči únavě

Tato funkční zkouška byla provedena dle kapitoly 4.13 na 18 zkušebních tělesech vyřezaných ze zkušebních desek 1, 3, 5 a 6. Výsledky této zkoušky jsou uvedeny v tabulce č. 22. Výsledná odolnost vůči únavě zkoušené směsi je $\varepsilon_6 = 168,3 \cdot 10^{-6}$, čímž vyhovuje minimálním požadavkům pro směsi typu VMT uvedených v TP 151. Graficky znázorněné výsledky zkoušky jsou uvedeny v grafu č. 8. Jednotlivé výsledky byly proloženy křivkou a bylo stanoveno relativní přetvoření při 1 000 000 cyklů.

Stanovení odolnosti vůči únavě	
Odolnost vůči únavě ε_6 [-]	$168,3 \cdot 10^{-6}$
Teplota zatěžování [°C]	10
Frekvence zatěžování [Hz]	25
Korelační koeficient R^2	0,7694
A_1 (B)	-10,0409

Tabulka 22: Stanovení odolnosti vůči únavě



Graf 8: Stanovení odolnosti vůči únavě

8. Závěr

Výsledky funkčních zkoušek jsem porovnal s TP 151 [1] (Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)).

Modul tuhosti navržené směsi [MPa]	9067	Vyhovuje
Modul tuhosti VMT dle TP 151 [MPa]	min. 9000	

Tabulka 23: Porovnání modulu tuhosti s TP 151

Odolnost vůči únavě navržené směsi ε_6 [-] [10^{-6}]	168,3	Vyhovuje
Odolnost vůči únavě ε_6 VMT dle TP 151 [-] [10^{-6}]	min. 125	

Tabulka 24: Porovnání odolnosti vůči únavě s TP 151

Navržená asfaltová směs VMT 16 s 30 % podílem R-materiálu a s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem splňuje požadavky na minimální modul tuhosti a minimální odolnost vůči únavě. Teplota porušení mrazovou trhlinou vyšla -13,6 °C, takže se dá o směsi říct, že má výbornou odolnost vůči působení nízkých teplot, protože se jedná o směs do ložných a podkladních vrstev vozovky.

Z uvedených výsledků vyplývá, že navržená směs typu asfaltového betonu pro ložní a podkladní vrstvy vozovek s vysokým modulem tuhosti s použitím 30 % recyklovatelné asfaltové směsi splňuje požadavky. Modul tuhosti je na dolním požadovaném limitu, únava převyšuje požadavky. Odolnost proti mrazovým trhlinám, která nemá v TP 151 stanovenou mezní hodnotu vykazuje dobré hodnoty ve srovnání s jinými asfaltovými směsmi.

Pokud by se použily úpravy čáry zrnitosti (zrnitost přesně podle Fullerovy paraboly nebo vedená nad parabolou), snížila by se mezerovitost směsi kameniva, dosáhlo by se nižší mezerovitosti asfaltové směsi a mohl by se snížit obsah asfaltu. Tímto výhodnějším složením by se získal vyšší modul tuhosti, únavové vlastnosti by se nezměnily nebo by se také zlepšily. Jelikož by se zlepšila homogenita zkušební vzorku, nedošlo by ke kroucení zkušebních těles ve zkoušce odolnost proti mrazovým trhlinám, a i tento výsledek by se zlepšil.

Při měření se ukázalo, že zabroušením vzorků, tj. odstraněním pórů a povrchových nerovností, došlo ke zvýšení modulu tuhosti o cca 10 %. Z tohoto důvodu je, zejména u směsí s vyššími moduly tuhosti, potřeba provádět měření na zabroušených vzorcích.

Závěrem lze konstatovat, že řešení směsi typu VMT 16 s použitím CRmB a vyššího podílu R-materiálu bylo první, jaké se v Silniční laboratoři provedlo.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TP 151. Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT). Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [2] VARAUS, M. Recyklace netuhých vozovek, Pozemní komunikace II. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav pozemních komunikací, 2012. Přednáška.
- [3] ŠPERKA, Pavel. *Vliv použití R-materiálu na funkční vlastnosti asfaltových směsí*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.
- [4] TP 148. Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik. Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury, 2009.
- [5] Asphalt in Figures 2016: VERSION 22-01-2018. European Asphalt Pavement Association [online]. Rue du Commerce 77 B-1040, Brussels, Belgium, 2018 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/2016/AIF_2016.pdf
- [6] Tisková zpráva. Sdružení pro výstavbu silnic [online]. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic, 2018, 5. 4. 2018. Dostupné z: <http://www.sdruzeni-silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReDDrrhuEkvxsDSS0YGye52u1WuhjDYb2Mijn7MlCB9tF%2bXrcLiCiotlhcLiMu9dJTUXp3XcFf3SWA8oZ8XVq1fYQxbNCjyTb2F%2boF5J5WUA2pKXeWB77%2bwyvFJxV2GRVzFqSSvZdiMkzXqptu8ARgbh1n7J0i9gSCd%2fK%2fzhlzsi46dXmJt873RxWI9YwktRJpABGVjoEYHsSL%2fFSBs4%2b7RDOemwCWCPZjeU%2b4G5C3WOQxRgg5xI2mi%2bNtl2J9IMKP%2fXt%2fTxfQuQIaRBQQk9a9NWhIQBXeeY4WYXwoZYuEsTZfq1hPLZCm%2frNQBmJqn0ILvBNgh5V6o6C6FUpbp1wb%2bfHusou5KEetETqaSTZ%2fQG8UTkpWksDPWW9dhvKH66XjMS2TXQ3HTxV4AaW9Qyr9gWDDjMRPGqCaIKxM6w1ObH7zZGtY7mVcWOvprg2pap%2fQylxv%2b%2bU6vcKMxfNkjmB%2bUZvn9Va%2bZYpqh40F7hmqjemDGBawsty1vAFU6VR5oug%3d%3d&tname=SiteContent.aspx>
- [7] VARAUS, M. Asfaltové směsi zpracováváné za horka, Pozemní komunikace II. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav pozemních komunikací, 2012. Přednáška.
- [8] ČSN EN 932-1. *Zkoušení všeobecných vlastností kameniva Část 1: Metody odběru vzorků*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [9] ČSN EN 933-1+A1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [10] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [11] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [12] ČSN EN 14771. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR)*. Praha: Český normalizační institut, 2012.

- [13] ČSN EN 12697-35+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [14] ČSN EN 12697-30+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [15] ČSN EN 12697-5+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [16] ČSN EN 12697-33+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [17] ČSN EN 12697-6+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [18] ČSN EN 12697-46. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [19] ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [20] ČSN EN 12697-24. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [21] ČSN EN 13108-1. *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [22] KUDRNA, J.; ŠPERKA, P.; PUDA, A.; KRÖNIG, M.; URBANEC, K., *Nové technologie výstavby ložních a podkladních vrstev, příspěvek na konferenci ASFALTOVÉ VOZOVKY 2017*, ISBN 978-80-906809-0-6, PRAGOPROJEKT, a.s., K Ryšance 1668/16, 147 54 Praha 4, České Budějovice, 2017.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	milimetr
kap.	kapitola
TP	technické podmínky
\$	dolar
bbl	barel (jednotka při měření objemu), 1 bbl = 158,987 litrů
CO ₂	oxid uhličitý
ČR	Česká Republika
t	tuna
tis.	tisíc
CRmB	crumb rubber modified bitumen
kg	kilogram
Hz	Hertz
PJ	penetrační jednotka
MPa	megapascal
s	sekunda
kN	kilonewton
min.	minimálně
max.	maximálně

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma šaržové obalovny [2].....	14
Obrázek 2: Kvartace R-materiálu.....	19
Obrázek 3: Kvartace R-materiálu.....	19
Obrázek 4: Prosévací přístroj	20
Obrázek 5: Přístroj pro stanovení penetrace jehlou	21
Obrázek 6: Přístroj pro stanovení bodu měknutí.....	22
Obrázek 7: Směs asfaltu z R-materiálu s CRmB po nalití do forem	23
Obrázek 8: Asfalt vyextrahovaný z R-materiálu po nalití do forem.....	23
Obrázek 9: Průhybový trámečkový reometr	24
Obrázek 10: Zkušební trámeček ve formě pro zkoušku na BBR.....	24
Obrázek 11: Vyrobená asfaltová směs pro výrobu zkušebních těles	25
Obrázek 12: Marshallova tělesa	27
Obrázek 13: Rázový zhutňovač	27
Obrázek 14: Pyknometry s asfaltovou směsí	28
Obrázek 15: Segmentový zhutňovač.....	29
Obrázek 16: Navážka v laboratorní míchačce	29
Obrázek 17: Zkušební asfaltová deska.....	30
Obrázek 18: Přístroj CYKLON-40	31
Obrázek 19: Zařízení COOPER pro stanovení tuhosti asfaltových směsí.....	32
Obrázek 20: Porušený vzorek po zkoušce	33
Obrázek 21: Vzorky R-materiálu po kvartaci	34
Obrázek 22: Uskladnění R-materiálu v Holubicích	35
Obrázek 23: Porušený vzorek (IV. 3) po zkoušce.....	47
Obrázek 24: Laboratorní bruska	49
Obrázek 25: Upevnění těles do přístroje.....	49
Obrázek 26: Zabroušená zkušební tělesa	49
Obrázek 27: Nezabroušená zkušební tělesa	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Používání R-materiálu v ČR a v zahraničí [5]	16
Tabulka 2: Výroba asfaltových směsí v letech 2007-2017 [6]	16
Tabulka 3: Výsledná hloubka penetrace asfaltu z R-materiálu.....	35
Tabulka 4: Výsledná teplota bodu měknutí asfaltu z R-materiálu.....	36
Tabulka 5: Sítový rozbor frakcí kameniva z R-materiálu.....	36
Tabulka 6: Poměr obsaženého pojiva v asfaltové směsi.....	38
Tabulka 7: Výsledná hloubka penetrace smíchaného pojiva	39
Tabulka 8: Výsledná teplota bodu měknutí smíchaného pojiva	39
Tabulka 9: Výsledný modul tuhosti za ohybu a m-hodnota	39
Tabulka 10: Kritické teploty	40
Tabulka 11: Čára zrnitosti navržené směsi	41
Tabulka 12: Vlastnosti asfaltových směsí.....	42
Tabulka 13: Vlastnosti výsledné asfaltové směsi.....	43
Tabulka 14: Objemové hmotnosti Marshallovým těles	44
Tabulka 15: Maximální objemové hmotnosti směsí	44
Tabulka 16: Objemová hmotnost Marshallových těles výsledné směsi	45
Tabulka 17: Vlastnosti výsledné směsi	45
Tabulka 18: Vlastnosti zkušebních desek	46
Tabulka 19: Výsledky zkoušky stanovení nízkoteplotních vlastností	46
Tabulka 20: Modul tuhosti zabroušených zkušebních těles.....	48
Tabulka 21: Modul tuhosti nezabroušených zkušebních těles.....	50
Tabulka 22: Stanovení odolnosti vůči únavě	51
Tabulka 23: Porovnání modulu tuhosti s TP 151	53
Tabulka 24: Porovnání odolnosti vůči únavě s TP 151	53

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vývoj ceny ropy (v rozmezí let 1946-2014) [3].....	14
Graf 2: Výroba asfaltových směsí v letech 2007-2017 [6]	17
Graf 3: Čára zrnitosti kameniva z R-materiálu	36
Graf 4: Čára zrnitosti navržené směsi	42
Graf 5: Výsledky zkoušky stanovení nízkoteplotních vlastností	47
Graf 6: Modul tuhosti zabroušených zkušebních těles	48
Graf 7: Modul tuhosti nezabroušených zkušebních těles.....	50
Graf 8: Stanovení odolnosti vůči únavě	52

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|------------|--|
| Příloha 1: | Sítový rozbor kameniva získaného z R-materiálu |
| Příloha 2: | Stanovení penetrace jehlou a bodu měknutí na asfaltu vyextrahovaném z R-materiálu a asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem |
| Příloha 3: | Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost a mezerovitost vyráběných asfaltových směsí |
| Příloha 4: | Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru |
| Příloha 5: | Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti vzniku mrazových trhlin |
| Příloha 6: | Stanovení modulu tuhosti |
| Příloha 7: | Stanovení odolnosti vůči únavě |

Příloha 1: Sítový rozbor kameniva získaného z R-materiálu**Hmotnosti jednotlivých navážek**

		Číslo navážky	
		1	2
sítový test	Hmotnost před extrakcí [g]	1250,00	1252,30
	Hmotnost celkové navážky [g]	1093,41	1085,46
	Hmotnost po promývání [g]	1075,30	1072,03
	Hmotnost odstraněného fileru promytím [g]	18,11	13,43
extrakce asfaltu	Hmotnost patrony + fileru [g]	690,40	707,00
	Hmotnost prázdné patrony [g]	587,90	598,60
	Hmotnost fileru [g]	102,50	108,40

Množství asfaltu v R-materiálu

množství asfaltu [g]	54,09	58,44
množství asfaltu [%]	4,33	4,67
průměr [%]	4,50	

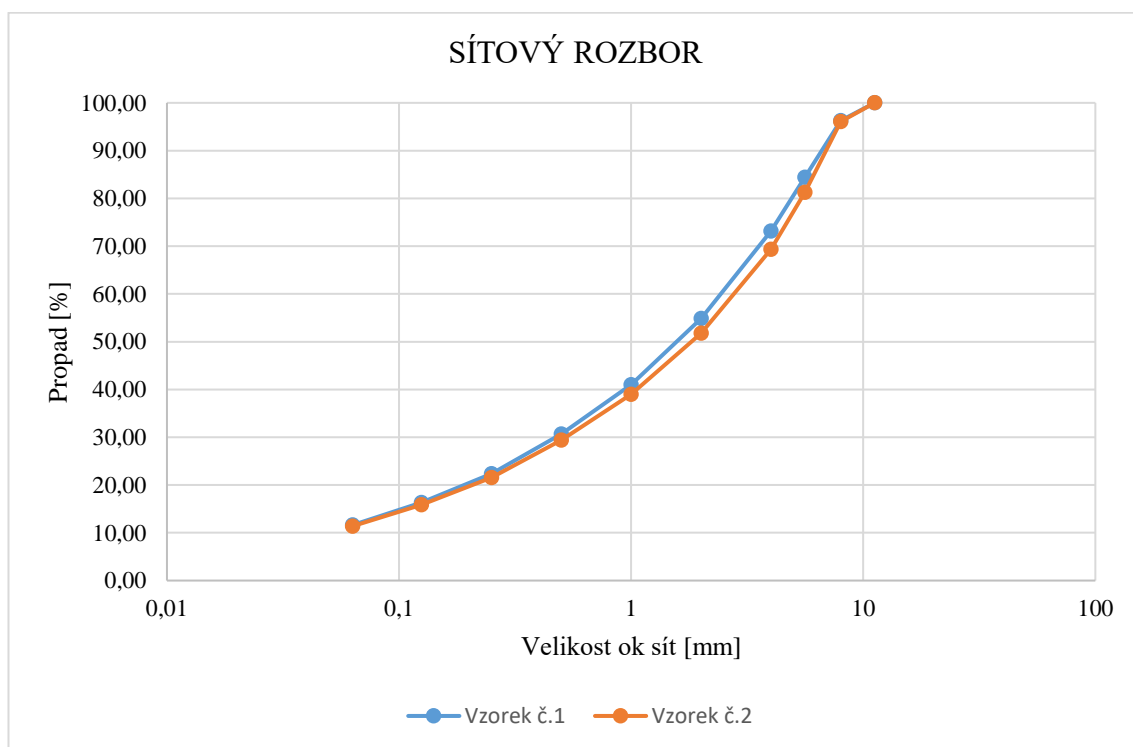
Sítový rozbor: vzorek č. 1

VYHODNOCENÍ-VZOREK Č.1			
Síto	Zůstatek [g]	Zůstatek [%]	Propad [%]
11,2	0,00	0	100,00
8	44,19	3,70	96,30
5,6	142,14	11,89	84,42
4	134,68	11,26	73,16
2	218,99	18,31	54,85
1	165,97	13,88	40,97
0,5	123,01	10,29	30,68
0,25	99,16	8,29	22,39
0,125	72,29	6,04	16,35
0,063	56,63	4,74	11,61
filer	138,85	11,61	0,00
celkem	1195,91	100,00	

Sítový rozbor: vzorek č.2

VYHODNOCENÍ-VZOREK Č.2			
Síto	Zůstatek [g]	Zůstatek [%]	Propad [%]
11,2	0,00	0	100,00
8	46,66	3,91	96,09
5,6	177,31	14,85	81,24
4	141,94	11,89	69,35
2	210,00	17,59	51,76
1	152,44	12,77	38,99
0,5	114,51	9,59	29,40
0,25	93,94	7,87	21,53
0,125	67,94	5,69	15,84
0,063	53,24	4,46	11,38
filer	135,88	11,38	0,00
celkem	1193,86	100,00	

Čára zrnitosti zkušebních navážek



Příloha 2: Stanovení penetrace jehlou a bodu měknutí na asfaltu vyextrahovaném z R-materiálu a asfaltu modifikovaném pryžovým granulátem

Stanovení bodu měknutí-metoda kroužek kulička				
Vzorek	Kulička	Teplota [°C]	Průměr [°C]	Difference
R-materiál	Pravá	67,4	67,4	0,1
R-materiál	Levá	67,3	67,4	0,1
R-materiál + CRmB	Pravá	67,5	67,5	0,0
R-materiál + CRmB	Levá	67,4	67,5	0,0

Stanovení penetrace jehlou-asfalt z R-materiálu			
Penetrace	Hloubka vpichu (mm)	Hloubka (PJ)	Průměr [PJ]
1	1,15	12	12
2	1,1	11	
3	1,3	13	

Stanovení penetrace jehlou-asfalt z R-materiálu + CRmB			
Penetrace	Hloubka vpichu [mm]	Hloubka [PJ]	Průměr [PJ]
1	3,24	32	32
2	3,09	31	
3	3,16	32	

Příloha 3: Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost a mezerovitost vyráběných asfaltových směsí

Stanovení objemové hmotnosti na zkušebních tělesech						
Množství asfaltu [%]	Číslo vzorku	Výška vzorku [mm]	Hmotnost suchého vzorku [g]	Hmotnost vzorku pod vodou [g]	Hmotnost osušeného vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
5,8	I.	64,35	1154,6	660,1	1165,2	2281,9
	II.	64,30	1157,5	661,2	1166,0	2289,0
6,2	I.	63,46	1155,3	661,3	1159,4	2315,4
	II.	65,35	1163,9	662,4	1174,5	2268,8
	III.	64,40	1150,1	653,8	1159,3	2271,2
6,6	I.	63,85	1175,9	673,6	1179,2	2321,7
	II.	65,95	1206,4	691,0	1212,8	2308,0
	III.	64,40	1166,8	665,8	1172,2	2300,1

Teplota vody [°C]	20,2
Hustota vody [kg/m ³]	998,26

Stanovení maximální objemové hmotnosti						
Množství asfaltu [%]	Číslo pyknometru	Objem pyknometru [mm ³]	Hmotnost prázdného pykn. [g]	Hmotnost plného pykn. [g]	Hmotnost plného + rozpouš. [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
5,8	V.	1323,097	693,0	1799,3	3207,5	2453
6,2	II.	1320,600	703,1	1906,5	3242,0	2438
6,6	III.	1308,164	685,1	1798,0	3167,2	2418

Množství asfaltu (%)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Maximální objemová hmotnost (kg/m ³)	Mezerovitost (%)
5,8	2285	2453	6,8
6,2	2293	2438	5,9
6,6	2310	2418	4,5

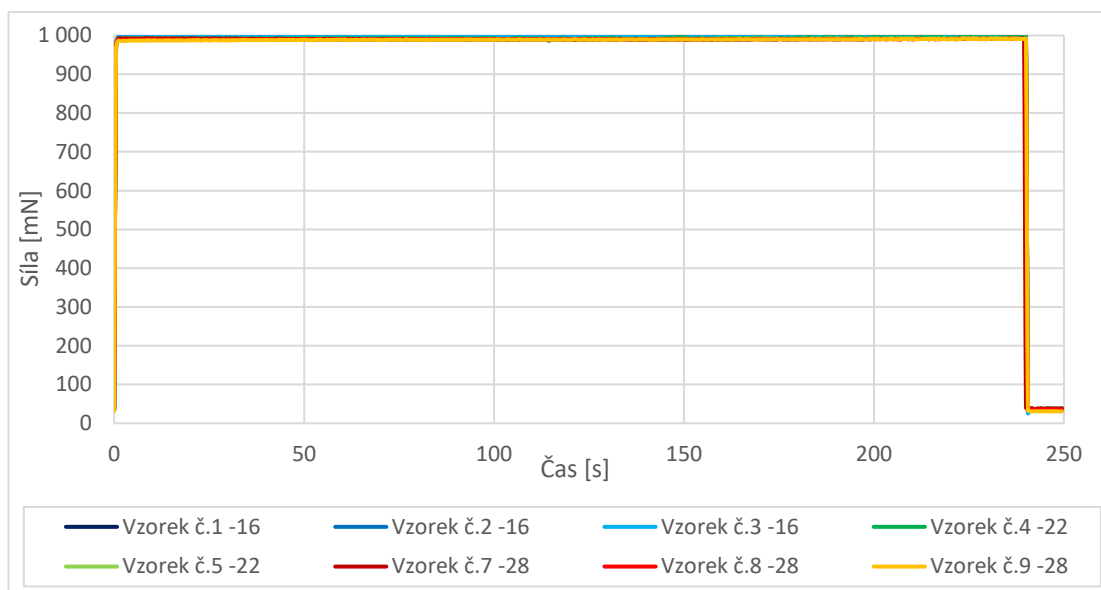
Stanovení objemové hmotnosti na zkušebních tělesech						
Množství asfaltu [%]	Číslo vzorku	Výška vzorku [mm]	Hmotnost suchého vzorku [g]	Hmotnost vzorku pod vodou [g]	Hmotnost osušeného vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
6,5	D1		9512,0	5487,8	9548,6	2340,1
	D2		9526,6	5512,0	9590,0	2333,8
	D3		9501,4	5494,6	9558,8	2335,7
	D4		9519,2	5506,8	9570,4	2340,4
	D5		9553,2	5482,0	9604,2	2314,5
	D6		9530,8	5488,0	9576,0	2328,4
	I.	64,65	1156,6	662,2	1163,6	2304,4
	II.	63,6	1160,2	663,2	1162,2	2322,7

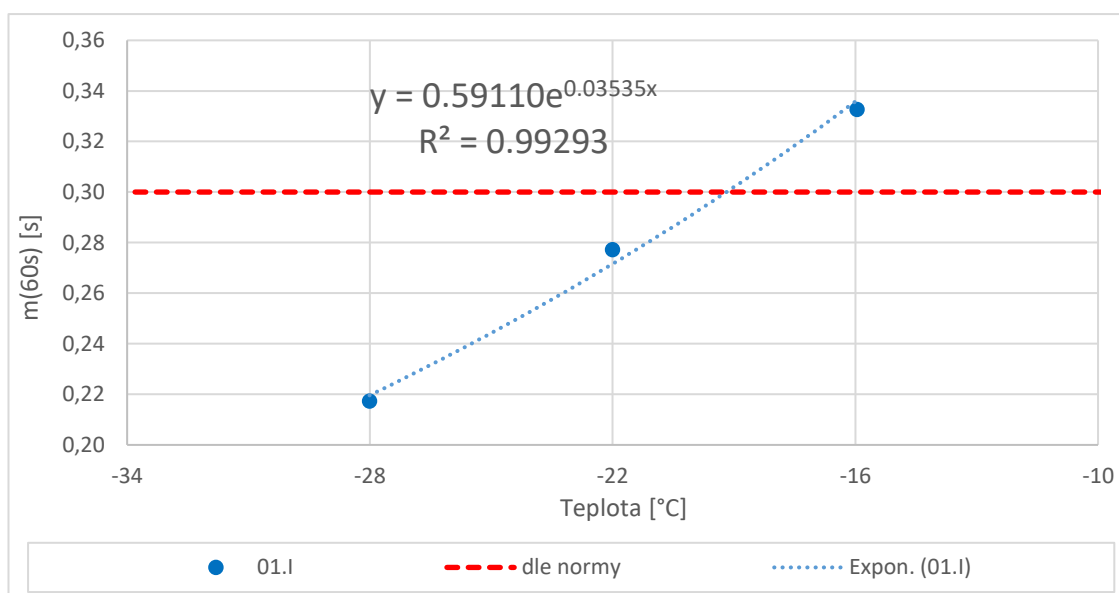
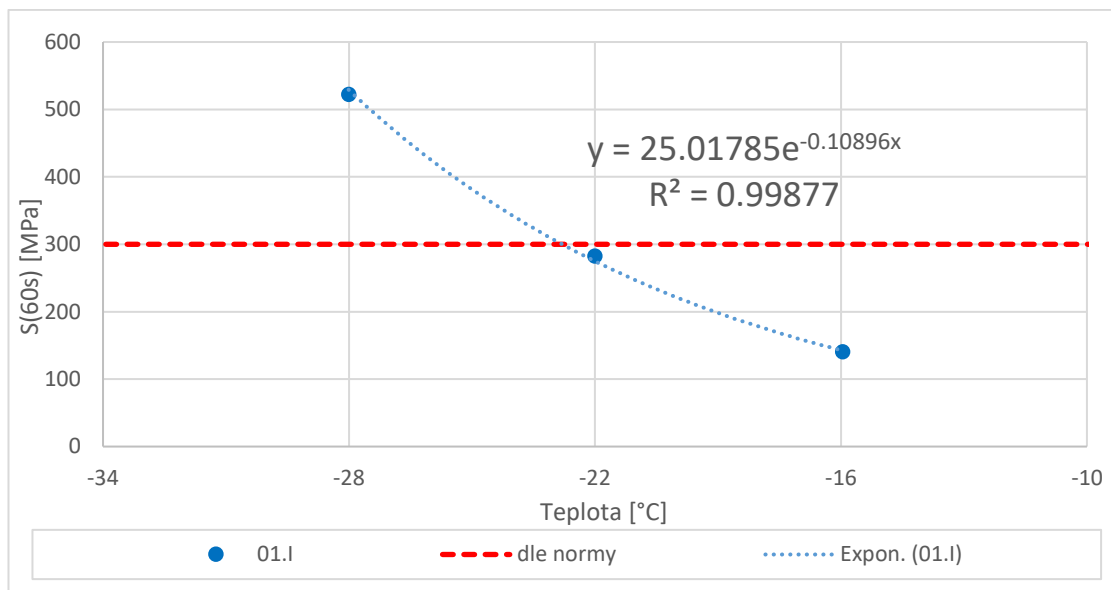
Teplota vody [°C]	16,3
Hustota vody [kg/m ³]	999

Stanovení míry zhutnění a mezerovitosti			
Deska	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Míra zhutnění (%)	Mezerovitost (%)
1	2340	101,1	3,8
2	2334	100,9	4,1
3	2336	100,9	4,0
4	2340	101,1	3,8
5	2314	100,0	4,9
6	2328	100,6	4,3

Příloha 4: Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru

Teplota [°C]	Vzorek	S_{60s} [MPa]	m_{60s} [s]	S_{60s} [MPa]	m_{60s} [s]
-16	č.1	117,1	0,338	140,5	0,333
	č.2	140,4	0,334		
	č.3	140,6	0,331		
-22	č.4	293,1	0,277	282,4	0,277
	č.5	271,6	0,277		
-28	č.6	554,0	1,131	522,2	0,217
	č.7	498,6	0,216		
	č.8	545,9	0,218		

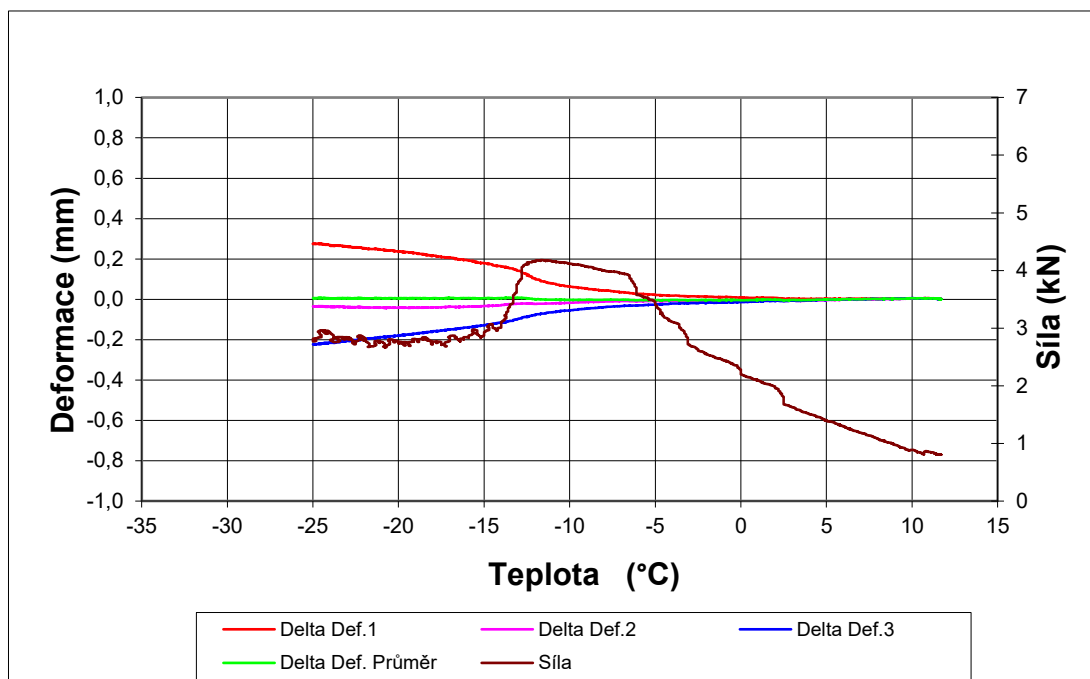




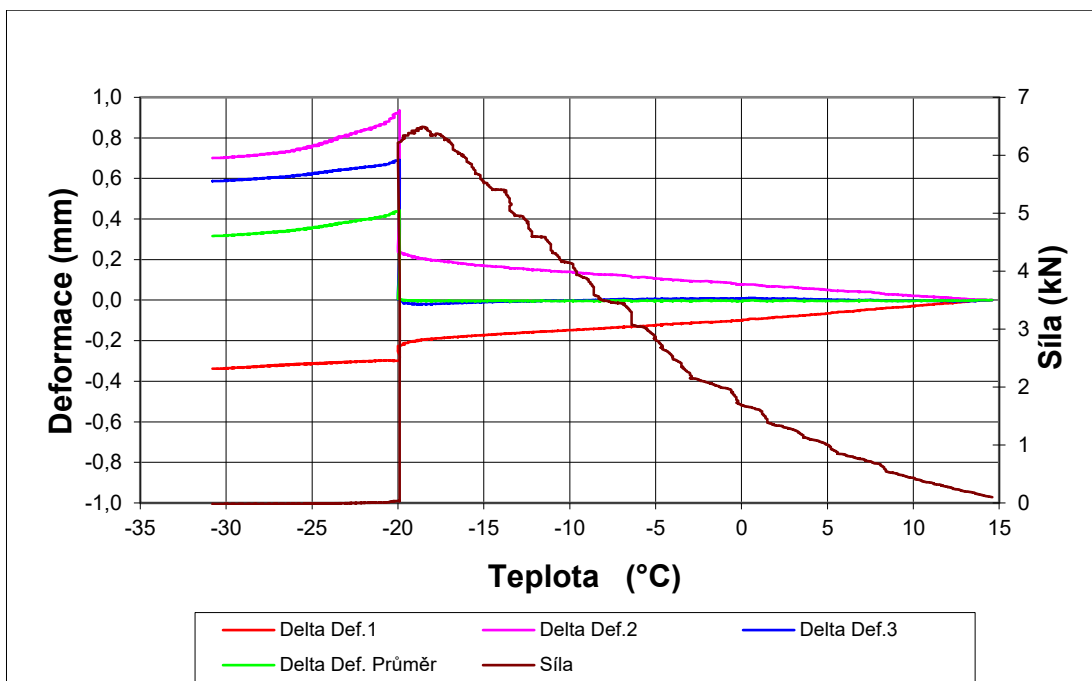
Zjištění teploty pro S_{60s} a m_{60s}			
	y		T [°C]
S_{60s}	25,01785	-0,10896	-22,8
m_{60s}	0,59110	0,03535	-19,2

Příloha 5: Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti vzniku mrazových trhlin

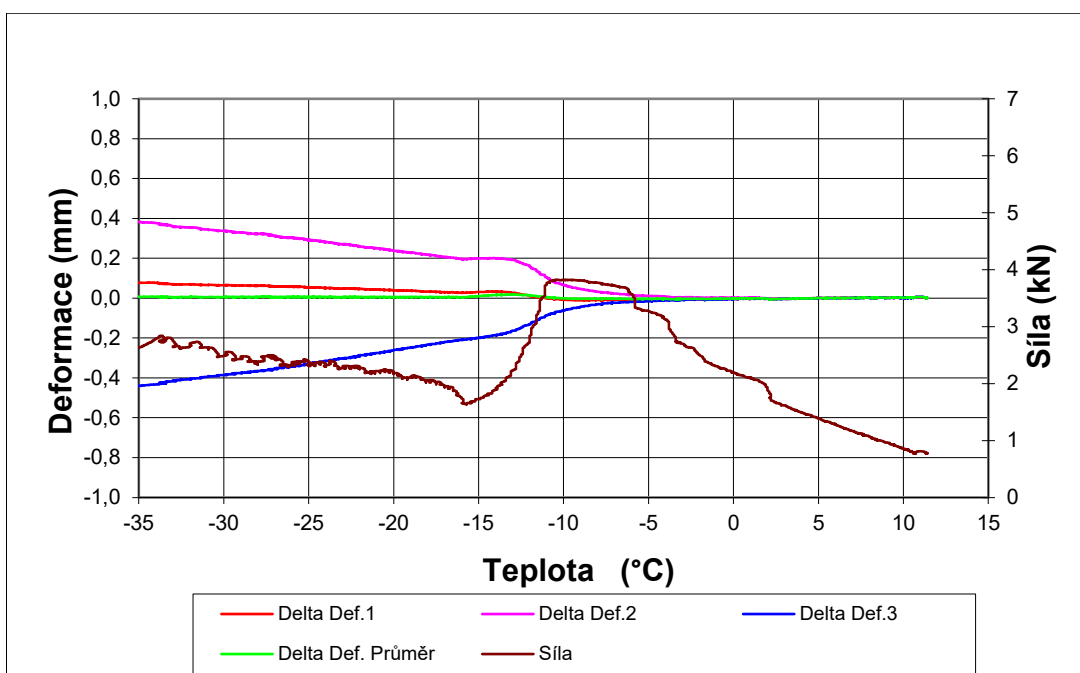
Akce :	Horáček BP
Asfaltová směs :	VMT16_VZ_IV-2
Rozměry zkušebního tělesa [mm]:	50.1 x 51 x 200
Datum zkoušky :	19.04.2018
Zkoušku provedl :	Horáček
Teplota temperování [°C]:	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování [°C/hod] :	10
Max. síla při porušení [kN] :	4,18
Max. napětí při porušení [MPa] :	1,60
Teplota v komoře při porušení [°C] :	-15,4
Teplota vzorku při porušení [°C] :	-11,7



Akce :	Horáček BP
Asfaltová směs :	VMT16_VZ_IV-3
Rozměry zkušebního tělesa [mm]:	50.6 x 50.9 x 200
Datum zkoušky :	24.04.2018
Zkoušku provedl :	Horáček
Teplota temperování [°C]:	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování [°C/hod] :	10
Max. síla při porušení [kN] :	6,49
Max. napětí při porušení [MPa] :	2,52
Teplota v komoře při porušení [°C] :	-22,1
Teplota vzorku při porušení [°C] :	-18,6



Akce :	Horáček BP
Asfaltová směs :	VMT16_VZ_IV-4
Rozměry zkušebního tělesa [mm]:	50.8 x 50 x 200
Datum zkoušky :	25.04.2018
Zkoušku provedl :	Horáček
Teplota temperování [°C]:	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování [°C/hod] :	10
Max. síla při porušení [kN] :	3,82
Max. napětí při porušení [MPa] :	1,51
Teplota v komoře při porušení [°C] :	-14,4
Teplota vzorku při porušení [°C] :	-10,5



Příloha 6: Stanovení modulu tuhosti**Moduly tuhosti pro obroušená tělesa: Teplota -5 °C**

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - III - 1	14623	16165	16826	17057	17396	17361	17664	18129
VMT16 - III - 2	14868	16389	17147	17556	17748	17803	18232	18506
VMT16 - III - 3	15299	16977	17598	17844	18165	18211	18364	18652
VMT16 - III - 4	14794	16503	17213	17514	17887	17874	18359	18814
VMT16 - I - 4	13727	15484	16221	16540	16930	16907	17349	17737
VMT16 Ø	14662	16304	17001	17302	17625	17631	17994	18368

Moduly tuhosti pro obroušená tělesa: Teplota 10 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - III - 1	8844	10534	11307	11699	12090	12187	12411	13337
VMT16 - III - 2	8970	10664	11438	11891	12261	12415	12717	13203
VMT16 - III - 3	8959	10717	11478	11897	12253	12409	12566	12905
VMT16 - III - 4	8587	10317	11062	11453	11837	11937	12182	12406
VMT16 - I - 4	7632	9396	10167	10577	11004	11022	11281	11531
VMT16 Ø	8598	10326	11090	11503	11889	11994	12231	12676

Moduly tuhosti pro obroušená tělesa: Teplota 15 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - III - 1	6671	8267	9014	9379	9720	10097	10452	11012
VMT16 - III - 2	7043	8674	9476	9955	10312	10512	10787	11717
VMT16 - III - 3	7101	8795	9571	9977	10315	10530	10670	10904
VMT16 - III - 4	6813	8495	9244	9669	10060	10169	10366	10557
VMT16 - I - 4	5649	7272	8032	8451	8830	8913	9466	10598
VMT16 Ø	6655	8301	9067	9486	9847	10044	10348	10958

Moduly tuhosti pro obroušená tělesa: Teplota 25 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - III - 1	3654	5022	5683	6068	6319	6503	6719	7028
VMT16 - III - 2	3953	5323	6063	6445	6749	6878	7246	7945
VMT16 - III - 3	3862	5264	5956	6349	6612	6799	6886	7052
VMT16 - III - 4	3596	4925	5603	5977	6230	6380	6838	7545
VMT16 - I - 4	2742	3919	4546	4908	5145	5289	5657	6209
VMT16 Ø	3561	4891	5570	5949	6211	6370	6669	7156

Moduly tuhosti pro obroušená tělesa: Teplota 40 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - III - 1	1215	1907	2290	2529	2688	2819	2917	3054
VMT16 - III - 2	1233	1925	2320	2571	2759	2866	3027	3278
VMT16 - III - 3	1277	1979	2362	2603	2763	2885	2933	3013
VMT16 - III - 4	1071	1700	2063	2289	2451	2560	2717	2964
VMT16 - I - 4	802	1316	1624	1816	1947	2043	2165	2341
VMT16 Ø	1120	1765	2132	2362	2522	2635	2752	2930

Moduly tuhosti pro neobroušená tělesa: Teplota -5 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - IV - 1	13289	14829	15469	15616	16055	16080	16455	16878
VMT16 - IV - 2	13322	14965	15669	15822	16242	16423	16956	17468
VMT16 - IV - 3	13929	15499	16060	16301	16659	16735	16946	17125
VMT16 Ø	13513	15098	15733	15913	16319	16413	16786	17157

Moduly tuhosti pro neobroušená tělesa: Teplota 10 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - IV - 1	7309	8981	9717	10023	10415	10532	10742	11849
VMT16 - IV - 2	7703	9459	10253	10587	10964	11245	11494	11814
VMT16 - IV - 3	7848	9567	10258	10622	10986	11190	11384	11639
VMT16 Ø	7620	9336	10076	10411	10788	10989	11207	11767

Moduly tuhosti pro neobroušená tělesa: Teplota 15 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - IV - 1	5714	7109	7836	8165	8525	8867	9241	9706
VMT16 - IV - 2	5907	7513	8283	8655	8991	9271	9512	10399
VMT16 - IV - 3	6067	7664	8400	8787	9110	9342	9486	9725
VMT16 Ø	5896	7429	8173	8536	8875	9160	9413	9943

Moduly tuhosti pro neobroušená tělesa: Teplota 25 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - IV - 1	2819	4056	4680	5038	5321	5456	5675	5965
VMT16 - IV - 2	2979	4237	4908	5242	5544	5679	5993	6471
VMT16 - IV - 3	3053	4362	4993	5372	5658	5790	5904	6056
VMT16 Ø	2950	4218	4860	5217	5508	5642	5857	6164

Moduly tuhosti pro neobroušená tělesa: Teplota 40 °C

Označení směsi	Frekvence							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - IV - 1	815	1366	1667	1881	2013	2116	2192	2258
VMT16 - IV - 2	829	1392	1711	1927	2067	2169	2275	2391
VMT16 - IV - 3	880	1452	1767	1974	2109	2205	2250	2311
VMT16 Ø	841	1403	1715	1927	2063	2163	2239	2320

Příloha 7: Stanovení odolnosti vůči únavě

Označení desky	Číslo vzorku	Přetvoření	Počet cyklů	log (N)	log e
VMT16 - III	1	0,000150	785621	5,89521308	-3,82390874
VMT16 - III	3	0,000153	2738537	6,43751861	-3,81530857
VMT16 - VI	1	0,000160	1266495	6,10260348	-3,79588002
VMT16 - V	1	0,000165	1597934	6,20355884	-3,78251606
VMT16 - III	4	0,000168	1760200	6,24556202	-3,77469072
VMT16 - III	2	0,000169	2280700	6,35806816	-3,77211330
VMT16 - VI	2	0,000170	996403	5,99843503	-3,76955108
VMT16 - V	3	0,000171	1472778	6,16813729	-3,76700389
VMT16 - V	2	0,000175	1024365	6,01045473	-3,75696195
VMT16 - VI	3	0,000179	391743	5,59300124	-3,74714697
VMT16 - V	4	0,000180	584052	5,76645152	-3,74472749
VMT16 - I	4	0,000191	75859	4,88000711	-3,71896663
VMT16 - I	1	0,000194	586900	5,76856411	-3,71219827
VMT16 - I	3	0,000196	295679	5,47082048	-3,70774393
VMT16 - VI	4	0,000198	95913	4,98187748	-3,70333481
VMT16 - I	2	0,000207	189300	5,27715061	-3,68402965
VMT16 - II	1	0,000224	52914	4,72357059	-3,64975198
VMT16 - II	2	0,000226	31967	4,50470188	-3,64589156